



**João Marques Ferreira
dos Santos**

**Avaliação da dispersão de penachos de torres de
refrigeração**





**João Marques Ferreira
dos Santos**

**Avaliação da dispersão de penachos de torres de
refrigeração**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego, Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Isabel Miranda
professora associada da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor Nelson Augusto Cruz de Azevedo Barros
professor associado da Universidade Fernando Pessoa

Prof. Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego
professor catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Prof. Carlos Borrego por todo o apoio dado na orientação tese, além de todas as palavras de incentivo.

Ao GEMAC por todos os conselhos que me deram, neste caminho de investigação científica.

Ao Doutor Miguel Coutinho e à Clara, que tiveram uma contribuição importante neste trabalho e aos quais este trabalho também está ligado.

Ao Prof. Luís Tarelho pelo apoio dado nos balanços térmicos o meu muito obrigado.

A todos os amigos que me deram força para caminhar, em especial Ao que é a minha fonte de esperança, o meu muito obrigado.

À minha família, que como porto de abrigo, sempre me deu força. A eles o meu muito obrigado, e a promessa de lhes dar mais atenção no futuro.

palavras-chave

Penachos de torres de refrigeração, modelos integrais, termodinâmica, avaliação de impacte ambiental.

resumo

O presente trabalho teve como objectivo o estudo comparativo de dois modelos de previsão das dimensões de penachos provenientes de torres de refrigeração – SACTI e SIAPTR. Para tal, procedeu-se primeiramente à caracterização de cada um dos modelos, atendendo, não só aos fundamentos físicos em que são baseados, mas também à estrutura de cálculo inerente a cada um.

Constatou-se que os dois modelos apresentavam dados de entrada diferentes; enquanto que o modelo SIAPTR faz a aquisição de ficheiros meteorológicos com base em radiossondagens, o modelo SACTI recorre a ficheiros com a caracterização meteorológica de superfície e dados relativos à altura da camada de mistura.

Após caracterização dos modelos foram avaliadas duas localizações com torres de refrigeração, testando-se os dois modelos em estudo.

A primeira análise abrangeu a comparação das dimensões dos penachos da torre de refrigeração da Central Térmica do Carregado, tendo-se usado os dados meteorológicos com os quais se havia feito a previsão de impacte ambiental dessas estruturas. Nos resultados obtidos observa-se uma ligeira sobre-estimativa dos resultados do SACTI face ao SIAPTR. Foi ainda possível demonstrar que o SACTI fornece uma informação mais abrangente quanto aos impactes ambientais causados por torres de refrigeração.

O segundo local de estudo foi a Central Térmica de Compostilla II, em Espanha. Para esta localização existia informação meteorológica detalhada, no formato de radiossondagens, sendo que cada registo estava associado a um penacho observável. Nesta análise o desempenho do SIAPTR foi superior ao SACTI, em especial nos penachos mais verticais.

No final, o modelo escolhido para aplicação na avaliação de impacte ambiental foi o SACTI. Este modelo constitui uma ferramenta muito versátil, fornecendo maior informação quanto aos impactes susceptíveis de serem causados por torres de refrigeração.

keywords

Cooling towers plumes, integral models, thermodynamics, environmental impact assessment.

abstract

The goal of this work was the comparative study between two models capable of predicting the plume dimensions from cooling towers – SACTI and SIAPTR. Therefore, each model was characterized individually, not only from the physical fundamentals point of view, but also its inherent numerical structure.

This previous analysis reported that the input data for these models was different; while SIAPTR model needs meteorological soundings inputs, SACTI requires meteorological surface and mixing height data.

Afterwards the description of both models, the performance of these models was tested in two locations with cooling towers.

In the first approach the comparison of the predicted plume dimensions obtained by SACTI and SIAPTR was carried out in the Carregado Power Plant. The meteorological data used was the same applied in the environmental impact assessment for this power plant. In this exercise SACTI predicted greater plume dimensions than SIAPTR model. There was also possible to illustrate that SACTI provided more complete information about the environmental impacts caused by cooling towers.

The second place analysed was the Compostilla II Power Plant, in Spain. A meteorological field campaign provided detailed meteorological data, in the format of soundings, which was associated with visible plume dimensions. In this application SIAPTR obtained better results than SACTI model, in special in the case of occurrence of very vertical plumes.

In the final, the chosen model to assess future environmental impacts from cooling towers was SACTI. This model is very versatile, providing more complete information about the possible environmental impacts caused by cooling towers.

“Na capa: Torres de refrigeração da central nuclear de Limerick, perto da cidade de Filadélfia, Estados Unidos da América. Foto de Jeff Jacobson. (<http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1071249,00.html>)”

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. TIPOS DE TORRES DE REFRIGERAÇÃO	1
1.1.1. Descrição geral	1
1.1.2. Modo de ventilação	4
2. IMPACTES NO AMBIENTE ATMOSFÉRICO.....	7
3. COMPORTAMENTO DOS PENACHOS NA ATMOSFERA	13
3.1. FORMAÇÃO DE PENACHO E FACTORES INFLUENCIADORES	13
3.2. TÉCNICAS PARA CONTROLAR A FORMAÇÃO DE PENACHO.....	15
3.3. INTERACÇÃO DE PENACHOS DE UM PARQUE DE TORRES DE REFRIGERAÇÃO	17
3.4. OCORRÊNCIA DE REBATIMENTO DO PENACHO AO SOLO	18
4. MODELAÇÃO DE PENACHOS DE TORRES DE REFRIGERAÇÃO	21
5. MODELOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS.....	25
5.1. MODELO SIAPTR.....	25
5.1.1. Estrutura do modelo SIAPTR	27
5.2. MODELO SACTI	30
5.2.1. Estrutura do modelo SACTI.....	37
5.2.2. Dados de entrada.....	43
6. APLICAÇÃO DOS MODELOS SACTI E SIAPTR À CENTRAL DO CARREGADO	47
6.1. ANÁLISE COMPARATIVA	47
6.1.1. Dados da central	47
6.1.2. Modelo SIAPTR.....	47
6.1.3. Modelo SACTI.....	48
6.1.4. Apresentação dos resultados	48
6.2. APLICAÇÃO DO SACTI	52
6.2.1. Estação de Inverno.....	54
6.2.2. Estação de Verão.....	59
6.2.3. Análise a nível anual	63
6.2.4. Conclusões finais.....	67
7. APLICAÇÃO DOS MODELOS SACTI E SIAPTR À CENTRAL TÉRMICA EM PONFERRADA	69
7.1. DADOS DA CENTRAL	69
7.2. INFORMAÇÃO METEOROLÓGICA	70
7.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	72
8. CONCLUSÕES.....	76
9. BIBLIOGRAFIA	78
ANEXO I – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DOS MODELOS APLICADOS	87
EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO SIAPTR	87
EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO SACTI.....	90
ANEXO II – FORMATO DOS FICHEIROS METEOROLÓGICOS NO SIAPTR.....	93
ANEXO III – INFORMAÇÃO DE SAÍDA DO SACTI.....	94
ANEXO IV – ESTRUTURA DO SACTI.....	97
ANEXO V – ELABORAÇÃO DE FICHEIROS METEOROLÓGICOS NO SACTI	98
ANEXO VI – ELABORAÇÃO DE FICHEIROS DE ALTURA DE CAMADA DE MISTURA.....	101
ANEXO VII – CAUDAL DE AR DE ENTRADA E POTÊNCIA DISSIPADA POR TORRES DE REFRIGERAÇÃO	103

ANEXO VIII – RADIOSSONDAGENS REALIZADAS NO CARREGADO.....	109
ANEXO IX – SUBPROGRAMA DE REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO SACTI.....	110
ANEXO X – CONCENTRAÇÕES NEFASTAS DE SAIS PARA A VEGETAÇÃO.....	112
ANEXO XI – RADIOSSONDAGENS REALIZADAS NA CENTRAL DE COMPOSTILLA II	114

ÍNDICE de TABELAS

TABELA 1. SUMÁRIO DAS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM VISTA À CALIBRAÇÃO DO SACTI (POLICASTRO <i>ET AL.</i> , 1994).....	33
TABELA 2. SUMÁRIO DAS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM VISTA À VERIFICAÇÃO DO SACTI (POLICASTRO <i>ET AL.</i> , 1994).....	34
TABELA 3. DADOS DA FONTE	47
TABELA 4. APRESENTAÇÃO DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A SITUAÇÃO DE VERÃO	50
TABELA 5. APRESENTAÇÃO DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A SITUAÇÃO DE INVERNO	50
TABELA 6. APRESENTAÇÃO DO CÁLCULO DAS DIMENSÕES DOS PENACHOS PELO SIAPTR, CONSIDERANDO UMA VELOCIDADE DE SAÍDA DE 2,5 M.S ⁻¹ E 3,0 M.S ⁻¹	51
TABELA 7. APRESENTAÇÃO DO CÁLCULO DAS DIMENSÕES DOS PENACHOS PELO SACTI, CONSIDERANDO UMA VELOCIDADE DE SAÍDA DE 2,5 M.S ⁻¹ E 3,0 M.S ⁻¹	51
TABELA 8. DADOS DA FONTE	70
TABELA 9. VALORES DE ALTURA DE CAMADA DE MISTURA DETERMINADOS	71
TABELA 10. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA USANDO O PARÂMETRO FAC2	74
TABELA 11. APRESENTAÇÃO DO FLUXO DO PROGRAMA <u>CONVERSOR_SACTI_SURFER.EXE</u>	110
TABELA 12. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE DEPOSIÇÃO SALINA CAPAZ DE CAUSAR DANOS NA VEGETAÇÃO (TALBOT, 1979).....	112
TABELA 13. NÚMERO DE ORDEM DE CADA REGISTO.....	114

ÍNDICE de FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática do funcionamento de uma torre de refrigeração seca (SPX Cooling Technologies, 2006).....	2
Figura 2. Representação esquemática do funcionamento de uma torre de refrigeração húmida (GEA Aircooled Systems).....	2
Figura 3. Torre de refrigeração seco-húmido com disposição em paralelo (Borrego <i>et al.</i> , 1987).....	4
Figura 4. Torre de refrigeração seco-húmido com disposição em série (Borrego <i>et al.</i> , 1987).....	4
Figura 5. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica (GEA Cooling Systems).....	5
Figura 6. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica circular (Lenntech Cooling Towers) [url 2].....	5
Figura 7. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica linear (Cooling Tower Depot).....	5
Figura 8. Fotografia de uma torre de tiragem assistida (Fotografia de Power Online).....	6
Figura 9. Diagrama psicrométrico (Borrego <i>et al.</i> , 1986).....	14
Figura 10. Representação esquemática da técnica utilizada para controlar formação de penacho (Wang <i>et al.</i> , 2007).....	16
Figura 11. Esquema da torre de refrigeração híbrida utilizada (Randall <i>et al.</i> , 1998).....	17
Figura 12. Descrição da operação realizada, em termos termodinâmicos (Randall <i>et al.</i> , 1998).....	17
Figura 13. Exemplo de uma torre de tiragem mecânica e formação de zona de esteira a jusante do edifício (Becker, 1979).	19
Figura 14. Forma simplificada de penacho utilizada pelo SACTI para previsão da diminuição da radiação solar (Carhart <i>et al.</i> , 1992).	35
Figura 15. Representação da forma da sombra calculada pelo modelo (Carhart <i>et al.</i> , 1992).....	36
Figura 16. Comparação da altura de penacho previsto, com base no parâmetro de altura e altura observada em três locais.....	39
Figura 17. Comparação do comprimento de penacho previsto, com base no parâmetro de comprimento e comprimento observado em três locais.....	40
Figura 18. Exemplo do uso de direcções de vento características para a modelação de plumas a partir dum local com três torres colineares de torres de tiragem natural.	41
Figura 19. Análise comparativa das dimensões dos penachos pelos dois modelos numa situação típica de Verão.	48
Figura 20. Análise comparativa das dimensões dos penachos pelos dois modelos numa situação típica de Inverno.....	49
Figura 21. Distribuição do diâmetro de gotas considerado no SACTI.....	53
Figura 22. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno.	55
Figura 23. Apresentação dos valores de humidade relativa mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno.	55

Figura 24. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Inverno.....	56
Figura 25. Distribuição do comprimento de penacho segundo as várias direcções.....	56
Figura 26. Distribuição de altura dos penachos na estação de Inverno.	57
Figura 27. Número de horas de sombra causada pela presença de penacho na estação de Inverno.	58
Figura 28. Massa de sal depositada na área em redor à central térmica na estação de Inverno.....	58
Figura 29. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão.	59
Figura 30. Apresentação dos valores de humidade relativa mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno.	60
Figura 31. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Verão.	60
Figura 32. Distribuição do comprimento de penachos na estação do Verão.	61
Figura 33. Distribuição de altura de penacho na estação do Verão.	61
Figura 34. Número de horas de sombra na estação de Verão.	62
Figura 35. Quantidade de deposição salina na estação de Verão.....	63
Figura 36. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão.	63
Figura 37. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão.	64
Figura 38. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Verão.	64
Figura 39. Função de distribuição de comprimento de penacho a nível anual.	65
Figura 40. Distribuição de altura de penacho a nível anual.....	65
Figura 41. Número de horas de sombra causado pela presença de penacho no ano de 2001.	66
Figura 42. Quantidade de deposição salina no ano de 2001.....	67
Figura 43. Fotografia da central de Compostilla II, em Ponferrada, Espanha [url5].....	69
Figura 44. Representação esquemática da selecção das direcções de vento representativas.....	72
Figura 45. Apresentação da comparação dos comprimentos previstos pelos modelos face aos valores reais.	73
Figura 46. Apresentação da comparação das alturas dos resultados previstos pelos modelos face aos valores reais.....	73
Figura 47. Representação do aspecto final dos dados meteorológicos, para constituição de um ficheiro meteorológico com o formato CD144.	100
Figura 48. Aspecto do programa responsável pela escrita de ficheiros no formato CD144.	100
Figura 49. Representação do aspecto final dos dados meteorológicos, para constituição de um ficheiro de altura de camada de mistura bi-diário com um formato TD9689.	102
Figura 50. Aspecto do programa responsável pela escrita de ficheiros no formato TD9689.	102
Figura 51. Esquema considerado para a realização do balanço mássico e energético da torre.....	103

1. Introdução

1.1. Tipos de torres de refrigeração

A produção de energia eléctrica em centrais térmicas envolve a produção de calor, para cuja dissipação se recorre muitas vezes a torres de refrigeração. Estas estruturas foram utilizadas em centrais térmicas em Portugal, estando prevista a sua utilização, no futuro próximo, em novas centrais. Pretende-se com este estudo contribuir para a caracterização de impacte ambiental causado por torres de refrigeração do tipo húmido. Com vista a alcançar esse objectivo, será feita a comparação de modelos capazes de simular os penachos de torres de refrigeração, após avaliação do seu desempenho, de forma a identificar o modelo mais adequado para avaliação de impacte ambiental.

1.1.1. Descrição geral

Torres de refrigeração são estruturas concebidas com vista à dissipação de energia da água de refrigeração por contacto com o ar atmosférico. Pode-se definir de forma muito simplista uma torre de refrigeração como um sistema de transferência de massa e calor (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983). Existem dois princípios de funcionamento: seco e húmido.

Na concepção seca, a água de refrigeração da caldeira é arrefecida ao passar no interior de permutadores em contacto com o ar; todo o calor é dissipado por condução. Os permutadores possuem uma grande extensão de pequenos tubos enrolados onde circula o fluido de refrigeração e através dos quais passa um determinado caudal de ar (Borrego *et al.*, 1987). Esta concepção tem como grande vantagem o facto de não consumir água; contudo apresenta uma menor eficiência face a torres de refrigeração húmidas, requerendo maiores dimensões. Na Figura 1. apresenta-se esquematicamente o funcionamento de uma torre de refrigeração seca.

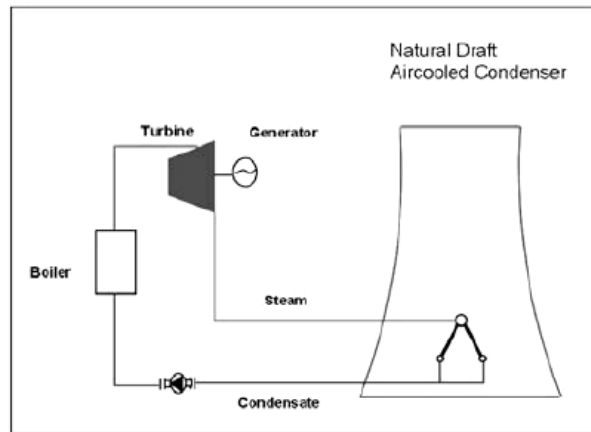


Figura 1. Representação esquemática do funcionamento de uma torre de refrigeração seca (SPX Cooling Technologies, 2006).

Nas torres de refrigeração húmidas, a água sofre um processo de pulverização e arrefece por contacto directo com o ar. Este tipo de torres tem uma maior eficiência na dissipação de energia, pois para além da dissipação de calor na forma sensível, há também a dissipação de calor na forma latente, devido à evaporação de água de refrigeração; esta evaporação constitui um consumo de água sendo necessário existir uma fonte de água. Por outro lado, a concentração de sais dissolvidos na água de refrigeração tende a aumentar devido à evaporação de água, sendo necessário contemplar a existência de purgas no sistema para evitar incrustações tartáricas (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983). No final do processo a água é recolhida numa piscina na parte inferior da torre, podendo ser novamente utilizada na refrigeração da caldeira. Na Figura 2 apresenta-se esquematicamente o funcionamento de uma torre de refrigeração húmida.

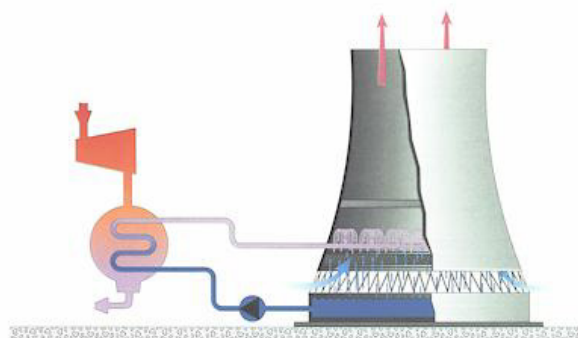


Figura 2. Representação esquemática do funcionamento de uma torre de refrigeração húmida (GEA Aircooled Systems) [url 1]

Nas torres de refrigeração húmidas ocorre ainda a formação de um penacho de ar húmido, saturado e a uma temperatura superior à do ambiente. Por balanço térmico verifica-se que,

para torres de refrigeração que apresentem um caudal de ar na ordem $30.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e uma diferença de temperaturas por volta dos $15 \text{ }^\circ\text{C}$, a dissipação de calor é de $6 \times 10^{12} \text{ J.h}^{-1}$ (1660 MW) (Borrego *et al.*, 1987).

Existem factores que afectam a taxa de transferência de calor. A promoção de uma maior área de contacto do ar com a água proveniente do sistema de refrigeração, e o acréscimo da velocidade relativa, do tempo de contacto e do diferencial de temperatura entre o ar à entrada e à saída são factores que aumentam a eficiência da torre. Neste cenário, o aumento da área de contacto da água com o ar pode ser realizado com recurso a pulverizadores de água e meios de enchimento na torre; para o incremento da velocidade do escoamento do ar na torre recorre-se frequentemente ao aumento da altura da torre ou a ventiladores; a ampliação da dimensão da torre permite alargar o tempo de contacto do ar com água (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983). A eficiência da torre de refrigeração mede-se com base na proximidade entre a temperatura da água à saída da torre de refrigeração e o termómetro molhado do ar circundante; deste modo, quanto menor for a temperatura de bolbo húmido, menor será a temperatura da água à saída da torre e maior será a eficiência da torre. A temperatura da água nunca será menor do que a temperatura de bolbo húmido do ar (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983; Khan *et al.*, 2004).

As torres de refrigeração seca constituem uma opção válida onde existirem carências de água (Borrego *et al.*, 1986).

As torres híbridas, que integram estas duas concepções, são uma solução de compromisso, que permitem uma operacionalização mais flexível. Basicamente trata-se de uma tecnologia mista onde coexistem as duas tecnologias associadas, o que permite, não só a conservação de água, mas igualmente promove a formação de penachos de menores dimensões (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983).

Estes sistemas podem ser concebidos segundo duas disposições – em paralelo ou em série. Na primeira disposição o ar atravessa um conjunto de dois sistemas – seco e húmido – dispostos em paralelo (Figura 3); no segundo caso, o ar atravessa primeiro um dos sistemas de refrigeração e de seguida o outro (Figura 4).

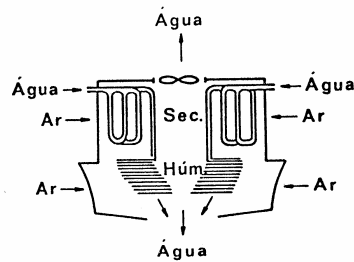


Figura 3. Torre de refrigeração seco-húmido com disposição em paralelo (Borrego *et al.*, 1987).

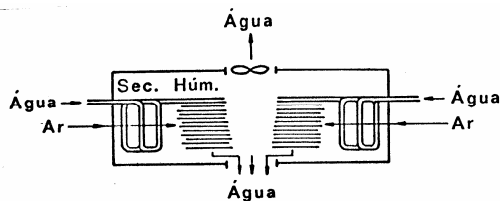


Figura 4. Torre de refrigeração seco-húmido com disposição em série (Borrego *et al.*, 1987).

Como o presente trabalho se destina a caracterização de penachos provenientes de torres de refrigeração húmida, apenas se abordara esta concepção de torres.

1.1.2. Modo de ventilação

Quanto ao modo como o escoamento do ar se pode estabelecer no interior da torre, existem três possibilidades.

Torres de tiragem natural

Neste caso a temperatura mais elevada da água no topo da torre, garante uma menor massa volúmica do gás no topo, o que associado a um perfil parabólico de construção, permite uma aceleração do escoamento atmosférico. Por conseguinte, não necessitam de mecanismos de ventilação mecânica. Como desvantagem, esta concepção requer estruturas que chegam a atingir os 200 metros de altura. Estas torres são mais adequadas em grandes instalações de produção de energia (Figura 2) (Cheremisinooff e Cheremisinooff, 1983).

Torres de tiragem mecânica

Nesta concepção o movimento do ar é estabelecido por intermédio de ventiladores, que garantem o escoamento no interior da torre (Figura 5). O caudal de ar gerado por tiragem

mecânica pode ser criado por um ventilador colocado na base da torre – tiragem forçada, ou colocado no topo da mesma – tiragem induzida (Khan *et al.*, 2004).

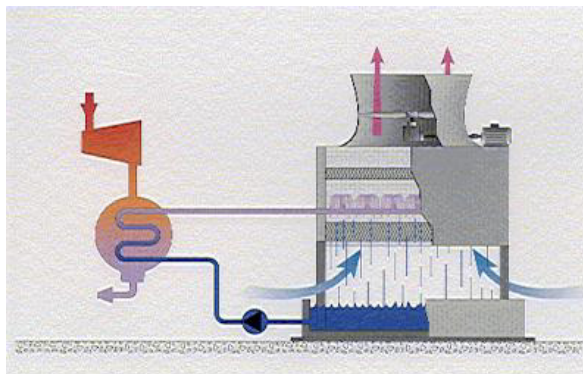


Figura 5. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica (GEA Cooling Systems) [url 1]

As torres de refrigeração mecânica podem ter duas configurações base: circulares ou lineares. Nas Figuras 6 e 7 estão apresentadas as duas representações.

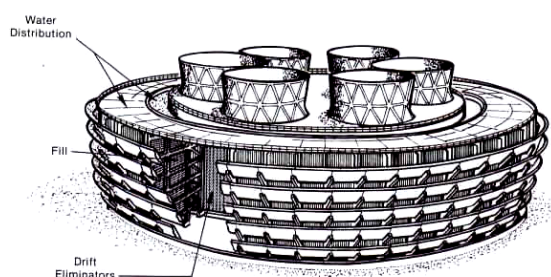


Figura 6. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica circular (Lenntech Cooling Towers) [url 2].

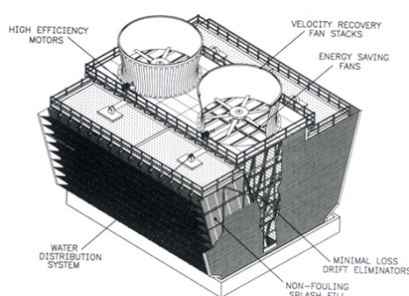


Figura 7. Representação esquemática de uma torre de tiragem mecânica linear (Cooling Tower Depot) [url 3].

Torres de tiragem assistida

São torres com uma forma geométrica semelhante às torres de tiragem natural; contudo como apresentam menores dimensões têm um sistema auxiliar de ventilação. Constituem uma solução de compromisso entre os dois tipos de torres anteriores apresentadas (Figura 8).



Figura 8. Fotografia de uma torre de tiragem assistida (Fotografia de Power Online) [url 4].

2. Impactes no ambiente atmosférico

Existem vários tipos de impactes ambientais associados à presença de torres de refrigeração do tipo húmido. Os impactes ambientais originados por uma torre de refrigeração estão de seguida apresentados (Borrego *et al.*, 1986):

- Impacte visual
- Impacte microclimático
- Primagem e queda de sais
- Impacte sonoro
- Impacte biológico

Impacte visual

O penacho à saída da torre, ao entrar em contacto com a atmosfera, sofre um arrefecimento, resultando numa diminuição da razão de mistura de saturação; por este facto, o vapor de água condensa, originando a formação de um penacho visível. A dimensão deste penacho é variável consoante os parâmetros de operação da torre, e das condições meteorológicas, em especial da humidade relativa, e deixará de ser visível quando a humidade relativa do penacho for inferior a 100%. A presença de penachos visíveis conduz à diminuição da visibilidade, o que em determinadas situações pode originar situações graves (Randall *et al.*, 1998). Um exemplo é a diminuição de visibilidade em vias de comunicação próximas de torres de refrigeração.

Os penachos provenientes das torres de refrigeração podem ser divididos em 3 grupos (Borrego *et al.*, 1987):

- Curtos, quando apresentem um comprimento inferior a 300 m;
- Médios, se o comprimento estiver compreendido entre 300 e 900 m;
- Longos, quando a sua dimensão for superior a 900 m.

De modo geral, para humidades relativas inferiores a 75% no topo da torre, existe vaporização quase imediata da nuvem quente produzida, desenvolvendo-se um penacho

curto. Para humidades relativas entre os 75% e os 90%, cerca de 40% dos penachos são curtos, 40% apresentam um desenvolvimento médio e 20% são longos. Com humidades relativas de 90%, os penachos longos ocorrem em 60% dos casos e os penachos de desenvolvimento médio ocorrem em 40% dos casos (Borrego *et al.*, 1986). Só em casos excepcionais se verifica o desenvolvimento de penachos curtos nestas situações.

A formação de *cumulus* atmosféricos é associada por vezes a penachos de torres de refrigeração. Lee (1977) afirma que a probabilidade de formação de nuvens convectivas a partir do penacho de uma torre de refrigeração é muito baixa; contudo, esta probabilidade poderá ter alguma expressão se existirem várias torres de refrigeração, podendo ocorrer a formação de *cumulus* acima dos 4000 metros.

Impacte microclimático

A formação de nevoeiro e gelo ao nível do solo constitui um dos impactos mais importantes deste tipo de estruturas. A formação de nevoeiro pode ser originada por elevadas velocidades de vento ou baixa velocidade de penacho, que podem levar ao rebatimento de penacho no solo (Schatzmann *et al.*, 1987). As alterações introduzidas pelos edifícios no escoamento atmosférico podem originar zonas de recirculação, induzindo o rebatimento do penacho na zona de esteira da torre de refrigeração.

O rebatimento de penacho ao nível do solo é mais frequente para torres com menor altitude, ou seja as torres de tiragem mecânica. A ocorrência destes fenómenos pode reflectir-se, por exemplo, na diminuição da visibilidade nas vias de comunicação, e no decréscimo da taxa de transmissão de electricidade por diminuição da temperatura dos cabos eléctricos que sejam interceptados pelos penachos provenientes das torres de refrigeração. Da experiência constatou-se que (Policastro *et al.*, 1984):

- As torres de tiragem natural não influenciam a formação de nevoeiro. Só em condições em que seja favorecida a recirculação do escoamento do penacho, por exemplo, pela presença de edifícios, é que existe a possibilidade de ocorrência de nevoeiro ao nível do solo;
- As torres circulares de tiragem mecânica induzem a formação de nevoeiro/gelo; contudo este fenómeno é originado em presença de valores levados de humidade

relativa e para velocidades de vento acima de $10\text{-}12\text{ m.s}^{-1}$, gama a partir da qual é mais sentida os efeitos de recirculação do escoamento de pluma, são superiores

- As torres lineares de tiragem mecânica originam mais facilmente a formação de nevoeiro/gelo, sendo este efeito mais acentuado a partir de velocidades compreendidas entre $8\text{-}10\text{ m.s}^{-1}$.

O fenómeno da diminuição da insolação e radiação solar incidente, pode originar diversas implicações. Este impacto apresenta consequências em zonas de recreação, actividades agrícolas, e na diminuição de captação de radiação solar para produção de energia (Policastro *et al.*, 1984).

Ryznar (1978) mediu o efeito dos penachos das torres de refrigeração. Como resultados constatou que os efeitos do penacho na diminuição da insolação são em geral menores que os da nebulosidade, sendo que o penacho apenas por breves instantes se pode sobrepor o efeito da nebulosidade atmosférica; concluiu ainda que este impacte é dependente das características do penacho, a sua localização e altura do dia, o que influencia o ângulo solar, sendo estes três factores que governam este impacte.

Existem ainda alguns registos de formação e queda de neve dos penachos de torres de refrigeração de tiragem natural (Koenig, 1981), em situações de temperaturas baixas.

Primagem e queda de sais

A primagem (em inglês: *drift*) refere-se à água líquida resultante do processo de pulverização na torre, que é arrastada na corrente de ar ascendente. Durante muito tempo este aspecto constituiu um dos principais impactes das torres de refrigeração. Esta água precipitava nas imediações da torre de refrigeração, originando chuvas artificiais com o inconveniente de poder causar zonas de humidade persistente ao nível do solo, o que em situações de temperatura abaixo de zero, poderia ocasionar o desenvolvimento de zonas de gelo (Borrego *et al.*, 1987).

Este impacte foi bastante minimizado com a introdução de chicanas anti-primagem que reduzem em mais de 99% a água líquida arrastada; contudo, considerando a massa de água de refrigeração, a quantidade de água líquida emitida pode ainda apresentar valores

substanciais. O espectro de diâmetro das gotas de água emitidas pode variar muito, desde alguns micrómetros até às centenas de micrómetros associados (Policastro *et al.*, 1994). As gotas de maior dimensão na atmosfera têm maior tendência para sedimentar nas proximidades, ao passo que as de menor diâmetro são arrastadas a maiores distâncias.

O impacte destas gotas na vegetação ou estruturas em redor vai ainda depender da concentração de sais dissolvidos na água líquida. Assim, a utilização, por vezes, de água salgada como fluído de refrigeração da caldeira, pode produzir um fenómeno de deposição salina na envoltória da central, causando danos na vegetação e acelerando a corrosão de estruturas existentes nas proximidades (Israel *et al.*, 1977). A primagem poderá ainda conter compostos existentes na água de refrigeração, como crómio, os quais são potenciais causadores de elevados prejuízos ambientais, devido à sua alta toxicidade (Parr *et al.*, 1976). A água líquida formada no penacho resultante do processo de condensação no penacho apresenta uma concentração de compostos químicos bastante reduzida, podendo apenas contribuir para a ocorrência de zonas de humidade persistente (Becker, 1979).

Este assunto em torres de refrigeração é então bastante importante, sobretudo nos casos de utilização de água salgada como fluído de refrigeração.

Impacte sonoro

O ruído gerado por uma torre de refrigeração húmida é devido sobretudo à queda de água e ao movimento dos ventiladores, no caso de estes existirem. Os níveis gerados por torres de tiragem natural rondam os 75 dBA a uma distância de 100 metros. Para torres de tiragem mecânica este valor pode sofrer um incremento de 5 dBA (Borrego *et al.*, 1987). No panorama legislativo nacional, o Decreto-Lei 9/2007 de 17 de Janeiro determina que as populações de zonas mistas (locais que permitem a implantação de zonas industriais) não devem ficar expostas a um nível de pressão diário sonora superior a 65 dBA e a um nível nocturno de 55 dBA; deste modo, este impacte também influencia a escolha do local de implantação de centrais térmicas. A monitorização do ruído emitido por uma torre de refrigeração fica geralmente incluído no plano de vigilância de ruído da central.

Impacte biológico

Associado a este tipo de estruturas foi identificada a presença de microrganismos na água de refrigeração, em geral a *Legionella pneumophila*. Algumas pessoas têm ficado doentes, depois de terem estado ou trabalharem em locais onde existiam torres de refrigeração, ou depois de terem passado ou vivido nas suas proximidades (Pastoris *et al.*, 1997; Colbert *et al.*, 2004), chegando a registar-se alguns casos fatais (Kirrage *et al.*, 2007).

Turetgen *et al.* (2005), num estudo que realizou com 103 análises de água de 50 torres de refrigeração, detectou em 44% das amostras o serogrupo de *Legionella pneumophila*, mesmo em torres com utilização de biocida. Esta bactéria desenvolve-se na presença de água quente, e pode originar a doença do legionário, quando se inspiram as gotas de água com este microrganismo (Pastoris *et al.*, 1997). Torna-se por isso necessário prever a existência de um plano de monitorização microbiológica regular (Sanli-Yurudu *et al.*, 2007; Soule *et al.*, 2000).

A breve caracterização dos impactes ambientais possíveis de ser originados por torres de refrigeração, mostra que é fundamental prever e minimizar os danos susceptíveis de serem causados por estas estruturas, sobretudo durante a fase de planeamento de construção de centrais térmicas que contemplem a utilização de torres de refrigeração do tipo húmido (Hanna, 1976).

3. Comportamento dos penachos na atmosfera

3.1. Formação de penacho e factores influenciadores

Estando muitos dos impactes ambientais das torres de refrigeração associados à presença de penacho de ar húmido (Policastro *et al.*, 1994), torna-se necessário conhecer e prever com exactidão o comportamento de penachos na atmosfera.

O penacho proveniente de torres de refrigeração é lançado sob a forma de um jacto que se mistura com o ar ambiente, dando-se uma diminuição rápida da temperatura; esta diminuição origina a condensação de vapor de água que só deixará de ser visível quando toda a massa líquida vaporizar. Com recurso a um diagrama psicométrico é possível prever quando ocorrerá a formação do penacho visível (Hanna, 1976), como é o caso apresentado na Figura 9. Neste caso a temperatura ambiente é de 10 °C e a humidade relativa 80% (Ponto A). O ar sofre então um aquecimento na torre de refrigeração (segmento AB), apresentando-se à saída saturado, a uma temperatura de 30 °C (ponto B). O penacho arrefece ao reentrar em contacto com a atmosfera, até retomar as características do ar ambiente; neste processo acontecem dois fenómenos, descritos pelos segmentos BS e SA. No segmento BS o penacho apresenta-se sobre-saturado face ao ar ambiente, sendo visível a presença de penacho, devido à condensação de vapor. No segmento SA o penacho já não é visível, pois apresenta-se sub-saturado, estando toda a massa líquida sob a forma de vapor; contudo ainda apresenta uma temperatura superior à atmosférica até atingir o ponto A, onde retoma as características do ambiente circundante.

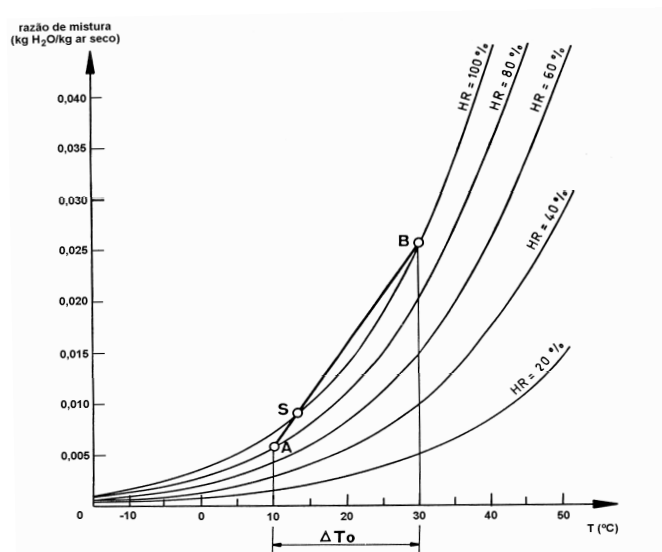


Figura 9. Diagrama psicrométrico (adaptado de Borrego *et al.*, 1986)

Com base no diagrama psicrométrico é possível verificar que quanto maior for a dimensão relativa do segmento BS face ao segmento SA, maior será o tempo que o penacho se apresentará sobre-saturado, e consequentemente maior será o tempo que este estará visível.

É de salientar que a utilização no diagrama de segmentos de recta é uma hipótese simplificadora com vista à explicação dos fenómenos envolvidos, considerando uma homogeneização perfeita da atmosfera quanto a temperatura e humidade. Para penachos mais desenvolvidos os fenómenos de troca de calor podem não ser segmentos de recta, pois a atmosfera apresenta gradientes de temperatura e humidade, quer horizontais, quer verticais (Hanna, 1976).

Com apoio no diagrama psicrométrico é ainda possível inferir a influência das condições atmosféricas e condições operatórias da torre nas dimensões de penacho.

Com base neste ábaco constata-se que para condições ambientais de menor temperatura e maior humidade relativa, o penacho visível apresentará dimensões maiores, pois o segmento BS terá maior dimensão relativa (Borrego *et al.*, 1986).

Como visto anteriormente, as condições operatórias da torre afectam a quantidade de calor dissipado; deste modo, verifica-se que quanto maior for a quantidade de energia dissipada,

maior será a diferença de temperaturas entre o ar ambiente e o ar à saída da torre, resultando um penacho de maiores dimensões.

Outro parâmetro operativo influenciador das dimensões de penacho consiste no teor de água líquida existente no penacho à saída da torre, resultante do processo de primagem. A presença de água líquida no penacho aumenta a sobre-saturação do penacho; esta situação origina um segmento BS (Figura 9) de maiores dimensões, o que implicará um mais volumoso.

São ainda identificadas duas fases principais na dispersão do penacho (Slawson, 1977; Slawson, 1981):

- Primeira fase – o movimento do penacho é sobretudo governado pela sua força ascensional;
- Segunda fase – o penacho fica sujeito à turbulência atmosférica, que influencia a componente horizontal do penacho.

3.2. Técnicas para controlar a formação de penacho

A formação de penachos de torres de refrigeração tem-se tornado matéria de crescente preocupação para as populações (Tyagi *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007). De facto, a formação de penacho em muitas condições não é aceitável, sendo necessário intervir de modo a evitar a formação de penacho acima de determinadas dimensões. Uma dessas situações corresponde ao rebatimento de penacho ao solo, que potencia a ocorrência de episódios de nevoeiro que põem em causa, por exemplo a segurança rodoviária e ainda acarretam custos significativos, pois diminuem a eficiência da torre de refrigeração, prejudicando o desempenho global de todo o sistema (Randall *et al.*, 1998). São várias as opções existentes para controlar a formação de penacho. O objectivo a atingir na prevenção de penacho, de acordo com o diagrama psicrométrico (Figura 9), constitui a diminuição da dimensão relativa do segmento BS, minimizando a zona de sobre-saturação. Uma operação passível de ser utilizada com este propósito, passa pelo aquecimento do penacho à saída da torre de refrigeração. Esta solução foi adoptada por Tyagi *et al.* (2007) e Wang *et al.* (2007) no controlo da dimensão de penachos de torres de refrigeração, utilizadas em

sistemas de ar condicionado, sendo o penacho aquecido com calor captado em painéis solares (Figura 10). Nesta aplicação pretende-se aumentar a razão de mistura de saturação do efluente, saindo o ar sub-saturado. Deste modo, evita-se que o penacho fique sobre-saturado ao entrar em contacto com a atmosfera, ou seja, que o segmento BS (Figura 9) atinja a zona de sobre-saturação.

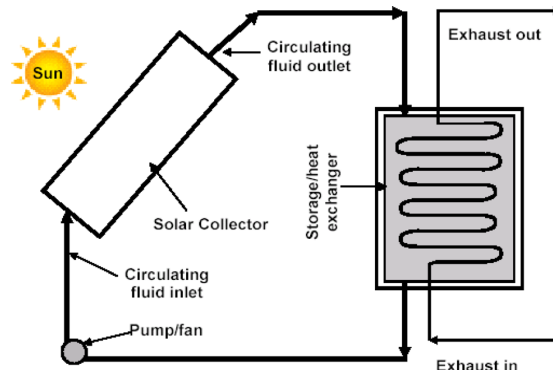


Figura 10. Representação esquemática da técnica utilizada para controlar formação de penacho (Wang *et al.*, 2007)

Outra situação na qual é necessário prevenir a formação de penacho acontece quando é posta em causa a segurança de aeroportos. Randall *et al.* (1998) apresenta uma situação na qual foi necessário prevenir o rebatimento de penachos ao solo, os quais originavam a formação de episódios de nevoeiro no espaço do aeroporto. Neste caso, após análise financeira, optou-se por substituir a torre de refrigeração instalada, por outra com uma concepção híbrida seca-húmida, com uma disposição em paralelo (PPWD – *Parallel Path Wet-Dry cooling tower*) (Figura 11). Neste tipo de torres, ocorre a refrigeração de ar por via húmida na zona inferior da torre; paralelamente é feita a introdução de ar atmosférico na parte superior da torre de refrigeração. O diagrama psicrométrico, apresentado na Figura 12, descreve a alteração termodinâmica executada.

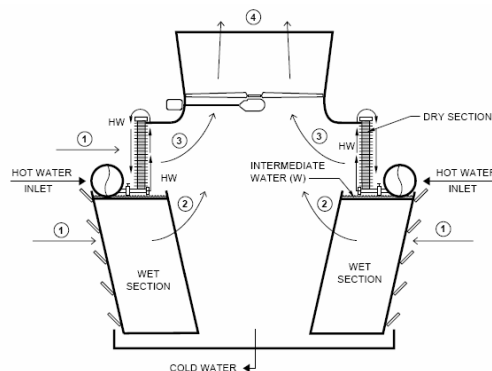


Figura 11. Esquema da torre de refrigeração híbrida utilizada (Randall *et al.*, 1998).

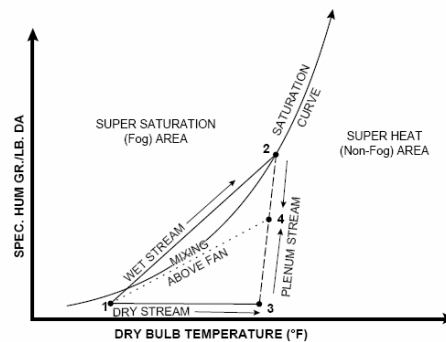


Figura 12. Descrição da operação realizada, em termos termodinâmicos (Randall *et al.*, 1998)

Com base no diagrama psicrométrico, constata-se que o ar de refrigeração à saída da parte inferior da torre de refrigeração apresenta-se saturado – ponto 2 da Figura 12. A introdução na parte superior, para além de contribuir para a refrigeração por via seca, permite reduzir a razão de mistura do efluente, resultando num efluente não-saturado.

3.3. *Interacção de penachos de um parque de torres de refrigeração*

A presença de mais de uma torre de refrigeração, pode levar à interceptação de penachos, o que leva a penachos mais longos e espessos.

Bornoff e Mokhtarzadeh-Dehghan (2001) com recurso à modelação física e numérica estudaram a interacção de penachos de torres de refrigeração, face à direcção de vento. Verificaram que a junção de penachos origina uma mútua protecção face à força de arrasto de vento, contribuindo para uma menor entrada de ar atmosférico, o que diminui a taxa de diluição e origina penachos de maiores dimensões e de maior verticalidade. Este efeito exercido é maximizado quando a direcção de vento for paralela ao alinhamento das torres de refrigeração e terá a menor importância quando a direcção de vento for perpendicular ao eixo das torres de refrigeração. As mesmas conclusões foram obtidas por Contini *et al.* (2006), Macdonald *et al.*, 2002, Contini e Robins (2001, 2004), Mokhtarzadeh-Dehghan *et al.* (2006).

3.4. Ocorrência de rebatimento do penacho ao solo

O escoamento atmosférico sobre uma torre de refrigeração afecta as características do funcionamento da torre. Deposição de sais, formação de nevoeiro e alterações micro-climáticas são impactes ambientais influenciados pelo campo de ventos (Becker, 1979).

A alteração do escoamento atmosférico sobre torres de refrigeração, pode originar o rebatimento de penacho na zona de esteira da torre, contribuindo directamente para a ocorrência de episódios de nevoeiro; adicionalmente, diminui a eficiência da torre devido a uma maior saturação do ar circundante, o que reduz o peso relativo da dissipação de energia na forma de calor latente.

Em 1999, Kayin avalia as causas que originam o rebatimento de penachos ao solo. Desta análise, o autor identifica a diferença de alturas entre a chaminé e os edifícios adjacentes, a temperatura e velocidade de saída de penacho e a frequência de ocorrência de ventos em direcção aos obstáculos, como as razões mais frequentes para este acontecimento. O mesmo autor demonstra ainda que a existência de edifícios mais altos induz mais facilmente o rebatimento de penacho, podendo esta situação ser corrigida por aumento da distância entre edifícios e torres de refrigeração, ou acréscimo da altura das fontes emissoras. Na prática, a EPA – Environmental Protection Agency – sugere em 1985, com base no conhecimento empírico do comportamento de penachos junto a obstáculos, a adopção de uma altura de chaminés 2,5 vezes superior às construções adjacentes, de modo a evitar que os penachos sejam capturados pela zona de esteira formada a jusante de edifícios.

O rebatimento de penachos é mais provável para torres de tiragem mecânica, por estas serem de menores dimensões face às torres de tiragem natural ou tiragem assistida. Na Figura 13 está apresentada uma imagem esquemática que exemplifica a relação existente entre o penacho e a zona de esteira formada.

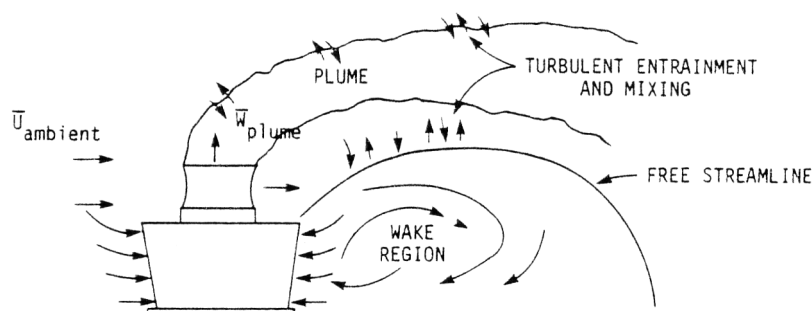


Figura 13. Exemplo de uma torre de tiragem mecânica e formação de zona de esteira a jusante do edifício (Becker, 1979).

O rebatimento de penacho para a esteira da torre de refrigeração é mais provável quando o escoamento é perpendicular ao edifício das torres de refrigeração. Reisman (citado em Becker, 1979), com recurso à modelação física, verificou que nesta direcção de escoamento a recirculação de penacho aumentava com o aumento da velocidade de vento até ao máximo de $3,6 \text{ m.s}^{-1}$; a velocidades de vento superiores o efeito da turbulência atmosférica adquiria maior importância na diluição do penacho, pelo que a probabilidade de rebatimento seria menor. Schatzmann *et al.*, (1987) recorreu à modelação física em túnel de vento para investigar o efeito de elevadas velocidades de vento no rebatimento de penachos de torres de refrigeração. Em geral, para torres de tiragem natural, a velocidade de penacho à saída da torre é menor do que a velocidade de vento, o que leva a que o penacho seja arrastado para a esteira da torre de refrigeração; contudo é pouco provável que o penacho atinja o solo, devido às elevadas dimensões destas torres.

A razão de velocidade transversal, K , definida como a razão entre a velocidade de vento com a velocidade de efluente, indica a importância do escoamento atmosférico no rebatimento de penachos. De facto, para valores de K superiores a 1,5 é provável que o penacho à saída da torre dobre, com uma forte probabilidade de ocorrer o seu rebatimento (Schatzmann e Policastro, 1984a). Os penachos de torres de refrigeração têm ainda um número de Froude baixo (Schatzmann e Policastro, 1984a), o que incrementa a probabilidade de rebatimento de penacho.

De forma a evitar o rebatimento de penacho, devido a elevadas velocidades de vento, existem várias medidas que permitem minimizar este impacte. Algumas das acções passíveis de serem adoptadas foram já apresentadas no capítulo 3.2. Outro procedimento

muito importante a considerar na prevenção do rebatimento de penachos é o alinhamento das torres de refrigeração com a direcção de vento predominante, pois nesta situação os penachos são mais verticais, como descrito no capítulo 3.3. Adicionalmente, pode ser aumentada a velocidade de saída dos penachos de torres de refrigeração, o que diminui o valor de K , reduzindo a probabilidade de rebatimento de penacho.

4. Modelação de penachos de torres de refrigeração

A modelização dos penachos de torres de refrigeração apresenta algumas diferenças fundamentais face ao comportamento dos penachos provenientes de caldeiras. Na modelação da dispersão de gases de combustão, o sistema a considerar é mais simples, podendo o comportamento dos gases de exaustão ser aproximado à idealidade; estes penachos têm ainda uma maior diferença de temperatura em relação à atmosfera (cerca de 100 °C) do que os penachos de torres de refrigeração (cerca de 15-30 °C) (Presotto *et al.*, 2005); desta situação resulta que os efluentes de torres de refrigeração tenham uma sobre-elevação menor, ficando mais depressa sujeitos à influência do vento (Schatzmann *et al.*, 1987). Adicionalmente, a interacção do penacho de ar húmido com a atmosfera é fortemente influenciada pela estabilidade atmosférica, turbulência e humidade relativa (Hamza e Golay, 1986). Por conseguinte, a modelação destes penachos deve incluir os fenómenos associados à mudança de fase entre o vapor de água e água líquida. A libertação de calor latente, resultante da condensação de vapor de água, afecta a força ascensional do penacho, pois a sua velocidade aumenta, devido à diminuição da massa volúmica (Lee, 1977; Hamza e Golay, 1986).

Com o objectivo de fazer a validação de modelos de simulação de penachos de torres de refrigeração, recorre-se muitas vezes a campanhas experimentais de medição das dimensões de penacho de torres de refrigeração, sob condições meteorológicas conhecidas. As medições meteorológicas feitas visam a caracterização do perfil vertical de temperatura, velocidade de vento e humidade, associando-se a obtenção de fotografias dos penachos verificados (Brennan *et al.*, 1976; Thorp e Orgill, 1984; Borrego *et al.*, 1987, entre outros).

Os modelos desenvolvidos com vista à caracterização das dimensões dos penachos de torres de refrigeração têm tido por base várias metodologias e complexidades. Existem formulações que se baseiam em princípios muito simples, com uma importante componente empírica, ao passo que outros recorrem à formulação diferencial para o cálculo das propriedades de penacho (Slawson, 1978).

As categorias de modelos utilizados para caracterização de penachos de torres de refrigeração são basicamente de dois tipos:

Modelos de pluma simples

Recorrem a fórmulas como a de Briggs (1969) para determinar a sobre-elevação do penacho. No caso de interação de penachos de torres de refrigeração usam um factor de aumento da força ascensional que relaciona a ascensão dos penachos juntos com a ascensão de um só penacho (Bornoff e Mokhtarzadeh-Dehghan, 2001), não tendo em conta aspectos aerodinâmicos do escoamento atmosférico sobre as torres de refrigeração. É exemplo desta classe de modelos, as fórmulas propostas em Hanna (1972); estas contudo revelaram um desempenho muitas vezes insuficiente (Policastro *et al.*, 1994).

Modelos baseados nas equações fundamentais da hidrodinâmica

São modelos baseados nas equações fundamentais da conservação da massa, quantidade de movimento, energia e da água. Estes modelos podem prever o escoamento atmosférico sobre as torres de refrigeração e a formação da resultante zona de esteira. Existem em duas formulações de cálculo – integral ou diferencial. Os modelos integrais são adequados quando se pretende calcular as características médias do penacho, assumindo um factor de entrada de ar no penacho como forma de diluição (Carhart e Policastro, 1991). A formulação diferencial permite prever o escoamento do penacho húmido em situações de maior turbulência, quando a descrição das características médias não é adequada; um exemplo de aplicação consiste na caracterização dos penachos em condições complexas (Meroney, 2006).

A modelação de penachos tem sido ao longo dos últimos anos alvo de diversos estudos, pelo que se irá apresentar uma breve descrição dos modelos desenvolvidos.

Hanna (1976) desenvolveu um modelo uni-dimensional de previsão da dimensão de penachos de torres de refrigeração, em que as características do penacho são apenas variáveis com a altitude. Os resultados foram avaliados com recurso a medições experimentais realizadas na central térmica de John Amos, nos Estados Unidos. O modelo contudo não considerava as mudanças de fase vapor de água – água líquida.

Em 1979, Becker desenvolveu um modelo numérico capaz de prever a recirculação de penachos em torres de refrigeração de tiragem mecânica, mais sujeitas ao rebatimento de penacho ao solo. Os resultados evidenciaram boa relação com medições em túnel de vento, à excepção de velocidades de vento mais baixas. Nesta situação o autor identificou a ausência das considerações de mudança de fase vapor/água líquida como o mecanismo responsável pelo fraco desempenho em situações de vento fraco.

Slawson (1977) apresentou um modelo de simulação de penachos de torres de refrigeração de tiragem natural, capaz de simular o rebatimento do penacho devido a elevadas velocidades de vento. Desta análise, concluiu que a ocorrência de rebatimento, pode aumentar os efeitos da turbulência do penacho e contribuir para uma diluição mais rápida deste. Em 1981, Slawson readaptou o modelo à simulação de penachos de torres de tiragem mecânica. Estas estruturas implicam um aumento da complexidade dos fenómenos associados, pois as torres de tiragem mecânica são mais pequenas, têm um escoamento de saída mais complexo, devido à turbulência gerada pelo sistema de ventilação mecânico; por outro lado podem originar mais facilmente o rebatimento de penacho ao solo. Adicionalmente, as torres de tiragem mecânica têm muitas vezes saídas não circulares e estão sujeitas a uma tensão tangencial do vento mais elevada por estarem mais próximas do solo.

Em 1984b, Shatzmann e Policastro apresentaram um novo modelo integral, calibrado com dados experimentais, que realizava a previsão da ascensão de penacho com um factor de exactidão de 2 e do comprimento com um factor de exactidão de 2,5.

Em Policastro *et al.* (1984) e Policastro *et al.* (1994) é proposto um modelo integral – SACTI – capaz de prever a formação de penachos resultantes de um parque de torres de refrigeração, incluindo factores como a formação de zona de esteira da torre e rebatimento do penacho ao solo. O modelo fornecia igualmente resultados sobre os impactes micro-climáticos e de deposição salina.

Em 1986, Hamza e Golay desenvolvem um modelo numérico euleriano com vista à caracterização do comportamento do penacho e os mecanismos mais importantes que influenciam a sua dispersão. Estes verificaram que a estrutura da camada limite, a hidrodinâmica do penacho e as equações de ar húmido são os factores que mais influenciavam a qualidade da previsão das dimensões de penacho.

Em 1989, Haman e Malinowski conceberam um modelo euleriano – ALINA –, uni-dimensional, de estado estacionário. O modelo considera um penacho apenas com componente de velocidade ascensional, sendo a horizontalidade do penacho originada unicamente pelo efeito de arrastamento do vento. O modelo foi testado com uma campanha experimental; na campanha experimental foram realizadas medições em altitude, com auxílio de um avião, de perfis de temperatura e humidade, quer na atmosfera, quer no interior do penacho. As características dos penachos calculados foram comparadas com os valores medidos, tendo-se concluído que os resultados concordavam em geral com um factor de exactidão de 1,5.

Janicke e Janicke (2001) desenvolveu um modelo lagrangeano tri-dimensional – PLURIS – capaz de simular o comportamento de penachos secos e húmidos, não estando preparado para simular o rebatimento de penachos. O modelo foi sujeito a três formas de validação – túnel de vento, túnel de água e campanhas de medição, em situação de velocidades de vento baixas, que teriam pouca probabilidade de causar o rebatimento do penacho. Prevê-se o desenvolvimento do modelo para incluir o efeito de rebatimento de penachos.

Michioka *et al.* (2007), propõe um novo método para avaliação dos penachos de torres de refrigeração. O autor, com recurso à modelação física em túnel de vento, representa o penacho de ar húmido com um gás traçador; o trabalho apresentado, que tem como limitação a não inclusão de um penacho com vapor de água, pressupõe com base em Briggs (1984), que a influência do calor latente na ascensão de penacho é inferior a 10% face ao calor sensível. A comparação de resultados obtidos com dados experimentais mostra que o desempenho das simulações é semelhante ao verificado na realidade.

5. Modelos de simulação utilizados

5.1. Modelo SIAPTR

Este modelo, desenvolvido pelo Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, para a avaliação do impacto ambiental das torres de refrigeração da central térmica do Pêgo, é um modelo unidimensional, o que implica que os parâmetros do penacho são calculados em função da altura, estimando-se o comportamento dos penachos das torres de refrigeração.

O SIAPTR – *Simulação do Impacto Atmosférico de um Parque de Torres de Refrigeração* – usa como base de cálculo a técnica integral para estimar as características gerais dos penachos, representadas pelos valores das variáveis dinâmicas e termodinâmicas na linha central do penacho (Borrego *et al.*, 1990a); baseia-se nas equações de:

- Conservação da massa;
- Conservação da quantidade de movimento e energia;
- Conservação da quantidade de água em cada secção recta do penacho.

O modelo representa uma nuvem criada por uma perturbação inicial evoluindo na atmosfera caracterizada pelos perfis verticais de temperatura, de humidade e velocidade e direcção de vento. Foi desenvolvido de modo a estar de acordo com as relações conhecidas que dão a sobre-elevação dos penachos térmicos e o crescimento dos cumulus naturais (Borrego *et al.*, 1990a).

Apresenta como suposições (Borrego *et al.*, 1990a):

- As teorias de sobre-elevação dos penachos de Briggs (1975);
- A teoria de crescimento de cumulus (Weinstein, 1970);
- A água líquida é distribuída segundo uma microfísica simplificada de Kessler (1969);
- O efeito da velocidade do vento é parametrizado por recurso à força de arrasto exercida sobre o fenómeno.

Como referido anteriormente, a parametrização da água do tipo nuvem é feita segundo Kessler (1969). Nesta, o teor de água do tipo nuvem tem em conta:

- Ganhos:
 - Condensação do vapor de água dentro do penacho.
- Perdas:
 - Coalescência de gotas;
 - Conversão da água do tipo nuvem em tipo hidrometeoro;
 - Perdas por arrastamento de água do penacho.

Existem, segundo esta parametrização, duas classes de gotas:

- Tipo hidrometeoro – suficientemente pequenas com velocidades terminais inferiores à velocidade vertical;
- Água precipitação – mais volumosas, com velocidade de queda superior à velocidade de ascensão que alimentam a precipitação;

Esta parametrização contabiliza ainda as perdas de água por arrastamento e inclui um coeficiente que representa o défice em saturação do penacho se toda a água presente se evaporar no ar ambiente arrastado após um incremento ΔZ em altura, estando ainda este ar arrastado não saturado. Nestas condições se toda a água do tipo hidrometeoro se evaporar após o incremento ΔZ e se o ar misturado continuar não saturado, todo o penacho se tornará não saturado (Borrego *et al.*, 1990a).

A variação de temperatura do penacho tem em conta o seu estado de saturação, pois como apresentado anteriormente, esta variação é também dependente das mudanças de fase da água líquida. Assim, se o penacho se encontrar sub-saturado, a variação de temperatura apenas se deverá à expansão adiabática e a perda de calor ocorrerá por transferência de calor sensível. Caso exista saturação, a variação de temperatura terá ainda de contabilizar as perdas por evaporação da água líquida e os ganhos por solidificação da água líquida (se for caso disso) e por condensação.

A utilização das hipóteses de axi-simetria, semelhança e arrastamento, permite transformar as equações integrais num sistema de equações ordinárias não-lineares. A incerteza na simulação de alguns processos físicos (arrastamento, força ascensional, rebatimento) é compensada pela calibração do modelo (Borrego *et al.*, 1990a). As heterogeneidades no interior do penacho, sob o facto de este se encontrar no interior a uma temperatura mais elevado do que periferia são parametrizadas por factor de pico (E_w), de acordo com Meyer *et al.* (citado em Borrego *et al.*, 1986):

$$E_w = \frac{\text{excesso_de_vapor_de_água_no_centro_penacho}}{\text{vapor_de_água_estimado_por_cálculo}}$$

É ainda considerada a existência de um raio externo, dito “quantidade de movimento”, o qual possui uma quantidade de movimento distinta do ambiente atmosférico. Este raio é maior do que o raio determinado a partir da distribuição das diferenças de temperatura (Borrego *et al.*, 1986).

A simulação de configurações multi-torre baseia-se na hipótese de que a fusão de dois penachos independentes leva ao desenvolvimento de um só penacho, com uma secção recta igual à soma das secções rectas dos penachos que lhe deram origem. Por outro lado, a fusão entre dois penachos contíguos verifica-se quando, para uma determinada altura, a soma dos raios dos penachos for maior ou igual à distância entre as torres que lhe deram origem. Este tipo de aproximação só é correcta se os penachos do parque de torres de refrigeração se comportarem de forma igual (Borrego *et al.*, 1990a).

5.1.1. Estrutura do modelo SIAPTR

O modelo SIAPTR é constituído por um programa principal, ao qual estão associadas várias subrotinas. O processo de cálculo é iniciado pela selecção de opções de base à simulação, relativas à existência de ficheiros com dados meteorológicos e à forma sob a qual está descrita a humidade existente na atmosfera – ponto de orvalho ou humidade relativa. São ainda solicitados os dados referentes às características das torres de refrigeração.

Após aquisição dos dados de entrada, é iniciado o processo de cálculo das dimensões dos penachos, com incrementos variáveis em altura (0,01 em 0,01 m nos primeiros 10 m, de 1 em 1 m até aos 100 m, seguindo-se um intervalo de cálculo de 50 m até ao culminar do penacho). O ciclo de cálculo é terminado quando for nula a solução da equação da água do tipo nuvem ou da equação da quantidade de movimento do penacho.

O ficheiro de resultados termina com a informação do momento em que o penacho deixa de ser visível – *penacho visível* – e do ponto em que a sua quantidade de movimento é nula face ao meio atmosférico – *penacho q.d.m.*. Se a equação da quantidade de movimento se anular antes da equação da conservação da água, significa que se está perante um penacho que, supostamente, nunca deixará de ser visível, podendo confundir-se com o fundo nebuloso; nesta situação, apenas se apresentam os dados relativos ao penacho quantidade de movimento – *penacho q.d.m* (Borrego *et al.*, 1990a).

5.1.2. Dados de entrada

O programa apresenta como dados de entrada:

- Velocidade de saída do penacho, em m.s^{-1} ;
- Temperatura de saída do penacho, em K;
- Pressão atmosférica à altura das torres, em mb;
- Data, no formato dd/mm/aa;
- Hora, no formato hh:mm;
- Para os dados de radiossondagem:
 - Altura a que são feitas as leituras, em metros;
 - Temperatura ambiente, em $^{\circ}\text{C}$;
 - Velocidade do vento, em m.s^{-1} ;
 - Humidade relativa, [0-1] ou ponto de orvalho, em $^{\circ}\text{C}$.
 - É ainda necessário introduzir os dados relativos à azimute, altura angular e a distância do ponto de observação às torres de refrigeração. Estes dados são necessários caso se queira comparar os resultados do modelo, com dados experimentais.

Esta informação pode ser introduzida via consola ou via ficheiro. No caso de ser via ficheiro, a sua formatação está descrita no Anexo II.

É ainda necessário especificar:

- Nome da central, máximo 20 caracteres;
- Nome do local de implementação, máximo de 20 caracteres;
- Número de torres.

Caso o número de torres seja superior a 1, tem de se especificar:

- A distância inter-torres;
- A abcissa das torres;
- A abcissa relativa do ponto de fusão virtual;
- Número de ensaios a realizar.

As abcissas das torres têm como origem o centro da torre colocada mais à esquerda.

5.1.3. Dados de saída

Como informação de saída, o modelo SIAPTR apresenta:

- Ficheiro com dados meteorológicos usados;
- Ficheiro de pontos, com as coordenadas para a representação esquemática do penacho simulado, num referencial (XOZ);
- Resultados do modelo, com informação relativa a:
 - Altura acima das torres, Z (m);
 - Velocidade vertical do penacho, W (m.s^{-1});
 - Temperatura do penacho, TPO (K);
 - Temperatura do ar ambiente, TEO (K);
 - Teor em água do tipo hidrometeórico, QCO (g.g^{-1});
 - Teor em água do tipo precipitação, QHO (g.g^{-1});
 - Raio de penacho, RAI (m),

- Distância ao eixo da torre, X (m).

São ainda fornecidos os resultados do penacho visível e penacho quantidade de movimento, apresentando-se para cada quantidade:

- Altura;
- Comprimento;
- Raio;
- Quantidade de água remanescente.

Estes dados referem-se ao ponto máximo atingido por cada um dos penachos.

São ainda elaborados três outros ficheiros de saída:

- ESTAT.DAT – fornece uma estatística dos dados de saída;
- TAMPEN.DAT – Ficheiro com os tamanhos dos penachos;
- TERMINUS.DAT – Escreve qual a abcissa, a cota e o raio do penacho no ponto em que se verifica a condição de fusão.

O presente modelo foi sujeito a processo de validação por inter-comparação de resultados com dados experimentais obtidos na central de Ponferrada, em Espanha. Deve-se destacar que essa validação foi apenas parcial, já que não se dispunham de dados experimentais para uma altura superior a 800 metros e não era possível realizar medições com velocidades de vento superiores a 5 m.s^{-1} (Borrego *et al.*, 1990b). Também havia a impossibilidade de obtenção do teor de água líquida no penacho tipo nuvem e hidrometeórica.

5.2. Modelo SACTI

O SACTI – *Seasonal/Annual Cooling Tower Impact* – é um modelo desenvolvido para o Electrical Power Research Institute, na Califórnia, pelo Argonne National Laboratory e tem uma vasta aplicação no campo da previsão do impacte ambiental de torres de

refrigeração. O modelo foi desenvolvido no ano de 1984 (Policastro *et al.*, 1984), sendo utilizado, por exemplo, na previsão do impacto ambiental da central térmica de ciclo combinado de Wallula, nos Estados Unidos da América, no ano de 2002 (Don, 2002). O SACTI é um modelo integral uni-dimensional, no qual os resultados são unicamente dependentes da distância da linha central do penacho à saída da torre de refrigeração, supondo um penacho axi-simétrico. É resolvido um conjunto de equações diferenciais ordinárias não-lineares, para um regime estacionário. São consideradas as equações de conservação de massa, quantidade de movimento horizontal e vertical, entalpia e quantidade de água total (Carhart e Policastro, 1991).

Este modelo tem a capacidade de simular o impacto das torres de refrigeração numa base anual, podendo ainda diferenciar o impacto ambiental para cada estação do ano, ou outro período especificado.

O SACTI é capaz de simular penachos de uma ou várias torres de refrigeração, incluindo os efeitos de recirculação causados por zonas de esteira das torres de refrigeração. Pode ainda estimar a quantidade de água líquida que atinge o solo, assim como a quantidade de sais dissolvidos que precipitam; permite realizar a previsão de episódios de formação de nevoeiro e a diminuição da incidência solar causada pela presença de penacho.

O modelo recorre a algumas suposições importantes para descrever o comportamento dos penachos na atmosfera. A análise de sensibilidade realizada ao SACTI demonstrou que o factor mais importante na previsão das dimensões de penacho é a taxa de entrada de ar neste (Carhart e Policastro, 1991).

O SACTI descreve a força ascensional do penacho com base no Princípio de Arquimedes (Carhart e Policastro, 1991). No cálculo da quantidade de movimento horizontal do penacho, o modelo assume que à saída da torre de refrigeração a velocidade horizontal do penacho iguala a componente horizontal do vento.

Outra suposição importante é a estratificação em três raios concêntricos no interior do penacho, na fase de dispersão (Carhart e Policastro, 1991). Os três raios incluem:

- Um central, considerando o penacho uma massa de ar saturada e a uma temperatura superior ao ar ambiente, e correspondendo a cerca de 50% do raio;
- Um intermédio, considerando um penacho não saturado, mas a uma temperatura mais elevada face ao ambiente atmosférico;
- Um externo, apenas com uma quantidade de movimento diferente do ar atmosférico.

O modelo permite ainda a inclusão das zonas de esteira, formadas a jusante das torres de refrigeração. As zonas de esteira são parametrizadas de forma diferente, consoante se trata de torres de tiragem natural ou torres de tiragem mecânica; as últimas têm menor altitude e em geral estão implantadas em edifícios, originando a formação de uma zona de esteira mais próxima da linha central do penacho. É ainda distinguido o diferente comportamento aerodinâmico das torres lineares de tiragem mecânica das torres circulares de tiragem mecânica. Todos os valores necessários para a caracterização da zona de esteira foram obtidos experimentalmente (Carhart e Policastro, 1991).

O SACTI foi ainda calibrado para a fase de difusão na atmosfera, depois da anulação da quantidade de movimento vertical do penacho, ficando unicamente advectado pelo vento. A taxa de entrada de ar no penacho na fase de difusão foi igualmente calibrada com base em medições experimentais de gás traçador.

O processo de cálculo terminará quando a linha central do penacho, que está sobre-saturada, se encontrar a uma humidade relativa inferior a 100% (Carhart e Policastro, 1991).

A adaptação do modelo para fontes multi-torre inclui o processo de junção de penachos e zonas de esteira de maiores dimensões, face a configurações de uma só torre. O SACTI calcula o comportamento de penachos de um parque de torres de refrigeração, sejam estas torres de tiragem natural ou tiragem mecânica. O efeito da direcção de vento nas dimensões de penacho é igualmente contabilizado, pois como apresentado anteriormente, uma direcção de vento paralela ao eixo das torres causará penachos mais verticais, ao passo que uma direcção perpendicular às torres de refrigeração, conduzirá a penachos mais horizontais.

No processamento da junção de penachos, o modelo verifica, em cada passo se existe sobreposição de penachos. A partir deste ponto assume-se a formação de um penacho alongado, resultante de dois penachos circulares, preservando a direcção e a conservação de todos os fluxos anteriormente simulados (Policastro *et al.*, 1994).

A calibração para configurações multi-torre mostrou que se teria de perder alguma exactidão para fontes uni-torre, para poder atingir uma óptima calibração para os dois tipos de parques.

O modelo foi calibrado para várias velocidades e direcções de vento, e para torres de refrigeração com diferentes mecanismos de circulação de ar (Carhart e Policastro, 1991). Nas Tabelas 1 e 2 estão resumidas as campanhas experimentais realizadas com vista à calibração e verificação do SACTI.

Tabela 1. Sumário das campanhas experimentais realizadas com vista à calibração do SACTI (Policastro *et al.*, 1994)

N.º torres (n.º de células)	Tipo de tiragem	Local de ensaio	Localidade	N.º registos
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Lümen	12
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Chalk Point	14
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Paradise	13
1	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	6
2	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	3
4	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	8
1 (6)	Tiragem Mecânica	Laboratório	Kannberg/Onishi	6
5	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	3
4	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	8
1 (6)	Tiragem Mecânica	Laboratório	Kannberg/Onishi	6

Tabela 2. Sumário das campanhas experimentais realizadas com vista à verificação do SACTI (Policastro *et al.*, 1994)

N.º torres (n.º de células)	Tipo de tiragem	Local de ensaio	Localidade	N.º registos
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Chalk Point	2
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Gardanne	5
1	Tiragem Natural	Campanha experimental	Philippsburg	13
1	Tiragem Natural	Laboratório	EDF	15
1	Tiragem Natural	Laboratório	Pryputniewicz	3
3	Tiragem Natural	Campanha experimental	Neurath	7
3	Tiragem Natural	Campanha experimental	Amos	19
2 (8)	Tiragem Mecânica	Campanha experimental	Benning Road	10
2 (9)	Tiragem Mecânica	Campanha experimental	Gaston	10
3 (9)	Tiragem Mecânica	Laboratório	Kannberg	6
7	Tiragem Mecânica	Laboratório	Gregoric	7
1(7)	Tiragem Mecânica	Laboratório	Gregoric	5

Os resultados mostraram que o modelo consegue prever em 77% dos casos a ascensão da pluma com um factor de exactidão de 2, e o comprimento da pluma com um factor de exactidão de 2 para 60% dos penachos. É de salientar que o modelo permite a simulação do rebatimento do penacho, formado pela presença da zona de esteira da torre de refrigeração (Policastro *et al.*, 1994).

Diminuição da incidência solar

O SACTI apresenta um módulo de cálculo para a determinação da influência da presença de penacho na diminuição da radiação solar incidente.

Na diminuição da radiação solar incidente, um penacho de torre de refrigeração interfere sobretudo na componente da radiação directa, ao passo que a radiação difusa é pouco afectada (Carhart *et al.*, 1992). O SACTI fornece resultados em termos de número de horas de sombra, redução do fluxo solar total (MJ.m^{-2}) e redução do fluxo solar directo (MJ.m^{-2}).

O cálculo das dimensões da zona sombreada é feita hora-a-hora, considerando o ângulo solar e a direcção de vento. Neste processo o penacho é aproximado a um cone, cujo eixo se inicia na linha central de penacho e termina no seu ponto final, como se encontra esquematizado na Figura 14.

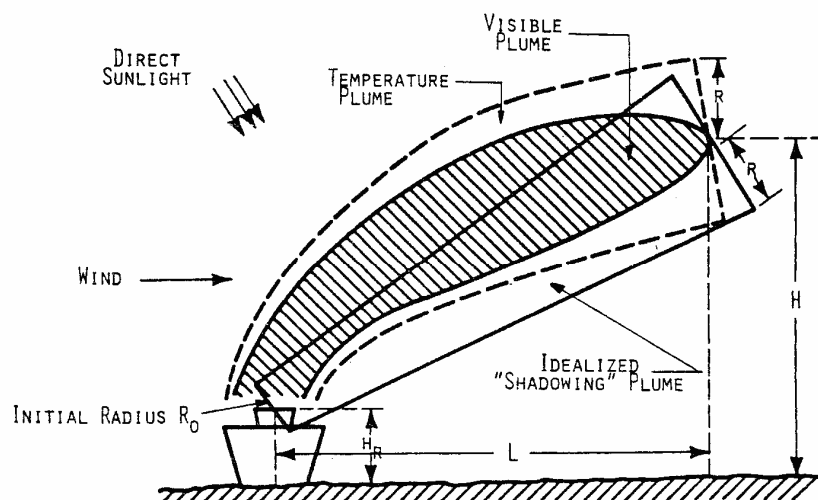


Figura 14. Forma simplificada de penacho utilizada pelo SACTI para previsão da diminuição da radiação solar (Carhart *et al.*, 1992).

Outra aproximação realizada é a consideração de 16 direcções de vento, com 50 círculos espaçados 200 metros, como apresentada na Figura 15.

O cálculo da radiação solar incidente tem de ser específico para cada local. Para realizar estas previsões é necessário a latitude e longitude do local, o índice de claridade mensal e o fluxo solar médio diário para cada mês do ano, informações disponíveis num atlas solar. Quanto à parametrização da absorção de luz pelo penacho, optou-se por um método de espessura óptica desenvolvido por Berge (citado em Carhart *et al.*, 1992), em que diminuição da radiação solar é dependente do raio do penacho.

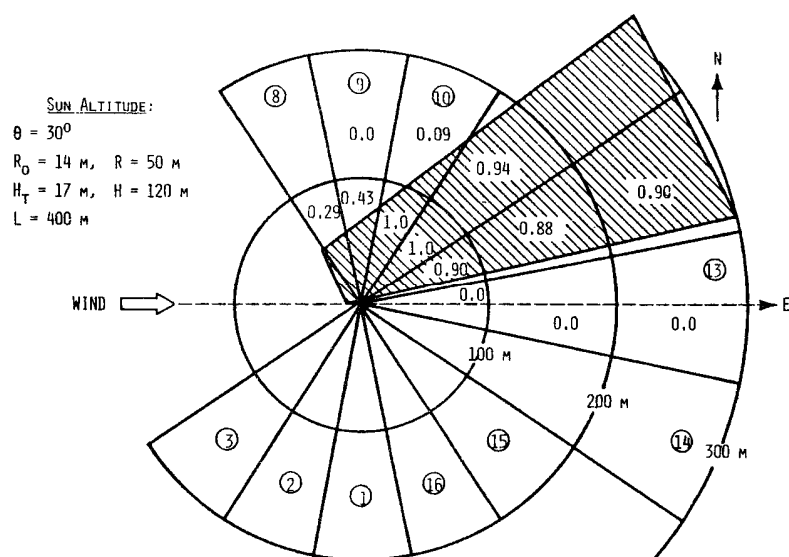


Figura 15. Representação da forma da sombra calculada pelo modelo (Carhart *et al.*, 1992).

Estimativa da precipitação de água líquida do penacho e sais dissolvidos

A emissão de água líquida pelas torres de refrigeração – primagem e consequente precipitação de sais dissolvidos pode conduzir a impactos significativos, originando danos na vegetação e acelerando a corrosão de estruturas. Esta situação é tanto mais gravosa quanto maior for a concentração de sais dissolvidos (Policastro *et al.*, 1994).

O SACTI possui um módulo de cálculo específico para estimar a quantidade de água e sais precipitáveis. Deste módulo de cálculo, um dos dados de entrada mais importantes é o espectro inicial de tamanhos das gotas de água líquida emitida. Estas gotas têm em geral um diâmetro superior a 20 μm e constituem a água de precipitação (Policastro *et al.*, 1994).

O sub-modelo de cálculo de precipitação de sais e água líquida foi testado com dados de precipitação de sais da experiência realizada em Chalk Point em 1977 (Policastro *et al.*, 1981), tendo revelado um factor de exactidão de 3, em relação à massa de sal e água líquida precipitada.

Foram identificadas 4 fases fundamentais no estabelecimento de um modelo de precipitação de sais e água líquida (Policastro *et al.*, 1994):

- fase de dispersão de penacho;

- formulação da evaporação de água;
- critério de precipitação de água líquida do penacho
- metodologia de deposição de primagem.

O módulo principal de cálculo para dimensão de penacho é também estimado para calcular a velocidade, temperatura das gotas de primagem (Carhart *et al.*, 1982). No módulo de formulação da evaporação de gotas são contabilizados os perfis de temperatura e saturação do penacho na evaporação das gotas, à medida que as variáveis atmosféricas também variam.

O critério utilizado para prever o abandono das gotas do interior do penacho baseia-se na distância das gotas à linha central do penacho; assim, quando a distância que existe entre uma gota e o centro do penacho é superior ao seu raio, considera-se que essa gota passa a constituir água precipitável (Policastro *et al.*, 1994).

A previsão do local de impacte das gotas que precipitam é feita com base no método balístico. Neste algoritmo a velocidade vertical é determinada pela velocidade terminal característica do diâmetro da gota, enquanto a sua velocidade horizontal é assumida como a velocidade do vento (Policastro *et al.*, 1994).

5.2.1. Estrutura do modelo SACTI

Foi verificado, que para determinado local, que apenas um número limitado de penachos ocorrerá (Policastro *et al.*, 1994). Deste modo é possível elaborar diferentes categorias, tendo em conta parâmetros meteorológicos e de emissão. Esta metodologia foi desenvolvida com vista a aliviar o esforço informático desenvolvido, agrupando penachos com um comportamento previsto semelhante. As categorias de penacho foram desenvolvidas com base em parâmetros adimensionais.

Na base da aceitação destes parâmetros, considerou-se um perfil de vento do tipo logarítmico, um perfil vertical de temperatura, e uma diferença entre o gradiente de temperatura seca e a temperatura de ponto de orvalho constante.

Para a elaboração das categorias de penacho, foram considerados quatro grupos de parâmetros adimensionais:

1. O número de Richardson

$R_i = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot D}{\rho \cdot W_o^2}$, em que W_o é a velocidade do penacho, ρ é a massa volúmica e D é o diâmetro da torre de refrigeração.

Este parâmetro tem como objectivo caracterizar a força ascensional da pluma.

2. Razão de velocidade transversal

$K = \frac{U}{W_o}$, em que U é a velocidade do vento à altura da torre de refrigeração.

Este parâmetro mede a importância da velocidade transversal (velocidade do vento face à velocidade ascensional do penacho).

3. Parâmetro de estabilidade

$S = \frac{D^2 g}{U^2 T_a} \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma_a \right)$ em que Γ_a é o gradiente adiabático seco.

Este parâmetro caracteriza a estratificação do ambiente.

4. Volume de diluição até à saturação (V_*)

$(V_* - 1)\phi + \phi_0 = \phi_{sat} ((V_* - 1)T + T_0)$ em que ϕ_{sat} é a razão de mistura de saturação.

Este parâmetro mede o volume de ar necessário para que uma unidade de ar de pluma seja diluída com o ar ambiente de modo a que a mistura fique saturada.

Destes parâmetros advêm:

Parâmetro comprimento

$$LP = \left(\frac{K^2}{R_i} \right) (\sqrt{n-1})$$

$$\text{Com } n = \max \left[1, 2 \left(\frac{R_i}{K} \right) (r_*^3 - 1) + 1 \right] \quad ; \quad r_* = \frac{V_*}{[K(V_* - 1) + 1]}$$

Parâmetro altura

$$HP = \max(r_* - 1, 0)$$

Estes parâmetros foram seleccionados para a elaboração das categorias de pluma, após terem demonstrado, respectivamente, uma boa correlação com o comprimento e altura adimensionais da pluma. Os conceitos de altura e comprimento adimensionais de penacho resultam da razão entre a altura e o diâmetro de saída da torre e comprimento de penacho com o raio. Estas relações estão demonstradas nas Figuras 16 e 17.

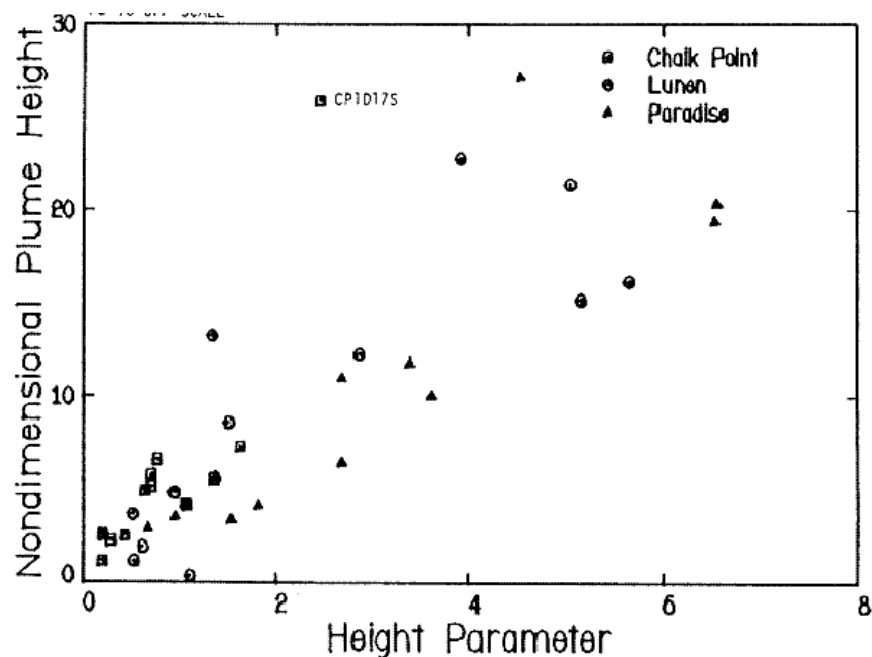


Figura 16. Comparação da altura de penacho previsto, com base no parâmetro de altura e altura observada em três locais (Policastro *et al.*, 1994).

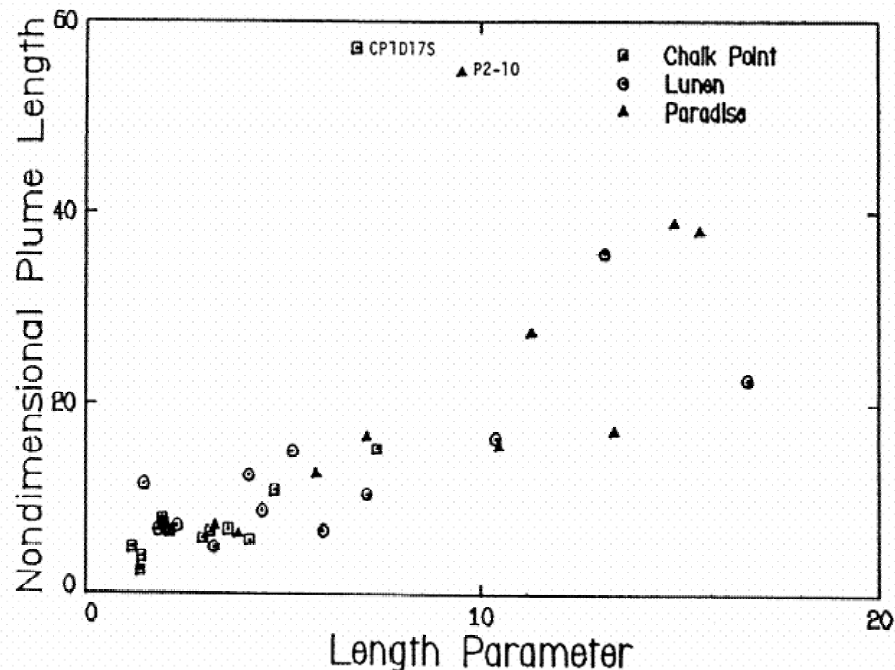


Figura 17. Comparação do comprimento de penacho previsto, com base no parâmetro de comprimento e comprimento observado em três locais (Policastro *et al.*, 1994).

Para auxiliar neste processo de elaboração de categorias, em configurações de multi-fonte foi adoptado o critério de diâmetro efectivo da fonte. Este conceito tenta agrupar as fontes que mais possam influenciar o comportamento da pluma. Recomenda-se que as torres sejam agrupadas por diâmetro efectivo quando se encontrem a:

- 5-10 diâmetros de distância para torres de tiragem natural;
- 2-3 diâmetros para torres circulares de tiragem forçada;
- 2-3 vezes a maior dimensão da estrutura linear de torre de refrigeração.

O cálculo do diâmetro efectivo para N torres de diâmetro D é feito com base na fórmula

$$D_{eff} = \sqrt{N} \cdot D$$

Um aspecto fundamental para o tratamento de configurações multi-fonte envolve a definição de direcções de vento representativas. Desta maneira, as 16 direcções de vento presentes nos dados meteorológicos são agrupadas de forma a minimizar o número de

possíveis variações a serem consideradas. Para um exemplo de três torres de tiragem natural orientadas segundo uma linha, as direcções de vento representativas serão as de:

- Escoamento perpendicular à linha formada pelas torres;
- A direcção segundo um ângulo de 45 graus face às torres de refrigeração;
- Quando a linha formada pela presença de torres for colinear com a direcção de vento.

Cada uma das 16 direcções de vento é depois relacionada com uma das direcções representativas, conforme o que se pode verificar na Figura 18. Neste exemplo, o número de categorias de pluma é aumentado por um factor de 3, quando os efeitos de direcionalidade de vento são incluídos. O número de direcções de vento representativas raramente excederá o número de 5, tendo-se adoptado este valor como número máximo de direcções de vento representativas. No final da simulação, são apresentadas as características de pluma por frequência de direcção de vento.

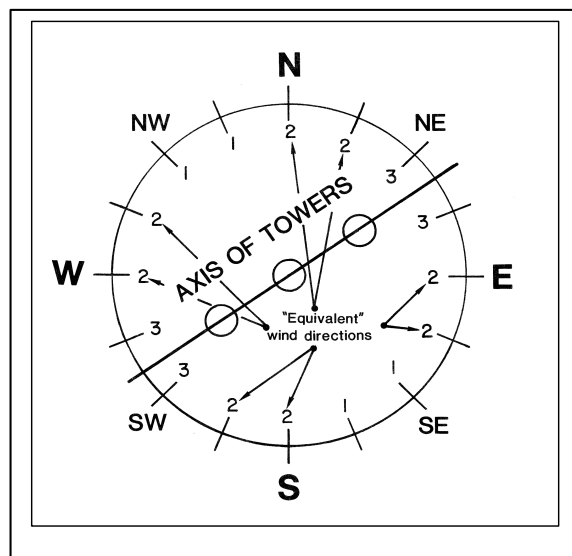


Figura 18. Exemplo do uso de direcções de vento características para a modelação de plumas a partir dum local com três torres colineares de torres de tiragem natural.

Este modelo é constituído por vários módulos separados:

1. PREPROCESSOR
2. PLUME

3. TABLES

4. PAGEPLOT

Preprocessor

Faz a análise dos dados meteorológicos, calculando para cada registo as condições de saída da torre, assim como os parâmetros adimensionais referidos anteriormente. De seguida calcula as tabelas de distribuição de diversos parâmetros por direcção de vento (ANEXO III).

Quando termina a leitura dos ficheiros meteorológicos, são escolhidas as categorias de pluma anteriormente referidas. As categorias são principalmente escolhidas com base no parâmetro comprimento. Os outros parâmetros usados na escolha são a razão de velocidade transversal, a classe de estabilidade e altura de camada de mistura. Numa simulação típica de um ano, são geralmente elaboradas 35 categorias de pluma, sendo este valor geralmente acrescido de 10 quando se pretende prever os episódios de formação de nevoeiro/gelo ao nível do solo.

É neste sub-programa que é feito o cálculo da radiação solar incidente e a sua difusão ao nível do solo. O cálculo destas informações é feito numa base horária, para que possa ser usada a variação do ângulo solar.

Plume

O código PLUME é usado para prever para cada categoria elaborada pelo PREPROCESSOR as características da pluma, usando cada direcção de vento representativa. É neste sub-programa que é calculada a distância até à qual e quantidade em que ocorre deposição salina; é igualmente feita a previsão dos episódios de formação de nevoeiro/gelo ao nível do solo. Por exemplo, assumindo no caso anterior 10 categorias de nevoeiro e 35 categorias de pluma, com 3 direcções de vento representativas, o número total de casos de pluma a ser simulado é de 135.

A distância considerada para o cálculo da ocorrência de episódios de nevoeiro e gelo pode ser definida pelo utilizador ou serem usados os valores-base deste *software*. O modelo

assume uma distância máxima de 1600 metros de distância à fonte, usando 16 raios igualmente espaçados, para o cálculo destes parâmetros. Cada raio é dividido em 16 sectores.

Os resultados destes cálculos são apresentados em termos de frequência de direcção de vento, apresentando-se a fracção de área afectada por nevoeiro/gelo.

Tables

Este subprograma apresenta, no formato de tabelas, as dimensões e a frequência de ocorrência de cada categoria de pluma como função da direcção de vento e estação do ano.

Pageplot

Esta é o último passo existente no modelo. Permite a apresentação gráfica de grandezas calculadas anteriormente, dando uma perspectiva da área afectada pela presença de pluma. Como a quantidade de software de representação gráfica disponível actualmente aumentou de forma significativa face a 1987, o recurso a este subprograma parece desnecessário.

Este sub-programa foi substituído por um programa desenvolvido com vista à apresentação dos resultados num *software* de representação gráfica (ANEXO IX).

O nome de ficheiros de entrada e saída estão presentes no ANEXO IV, sendo que a sua formatação se encontra descrita em Policastro *et al.* (1987).

5.2.2. Dados de entrada

Dados meteorológicos

Este modelo requer a introdução de um ficheiro meteorológico com dados de superfície e outro com dados de altura de camada de mistura bi-diários da atmosfera.

Quanto aos dados meteorológicos de superfície, requer:

- Ano
- Mês

- Dia
- Hora
- Altura de tecto de nuvens [centenas de pés]
- Ponto de orvalho [°F]
- Direcção do vento [direcção/10]
- Velocidade do vento [nós]
- Temperatura de bolbo seco [°F]
- Temperatura de bolbo húmido [°F]
- Humidade relativa [%]
- Cobertura nebulosa ou nebulosidade [0-9]
- Altura de camada de mistura (m)

Alguns destes parâmetros não estando disponíveis, tiveram de ser calculados com base em fórmulas presentes na literatura.

Quanto aos dados de altura de tecto de nuvens, recorreu-se a uma expressão matemática que considera um gradiente térmico adiabático. Nesta, a altura de nuvens é determinada, na altura onde a perfil vertical de temperatura seca e de ponto de orvalho se encontram.

Relativamente aos dados de cobertura nebulosa, caso estes não se encontrem nos ficheiros originais, têm de serem pedidos às estações meteorológicas mais próximas do local em estudo que realizem a medição deste parâmetro.

O modelo SACTI está preparado para receber os dados meteorológicos, segundo três formatos (CD144, TDF14, NRC), não aceitando a introdução de dados via consola.

Deste modo, foi elaborado um programa em FORTRAN que conseguisse ler um ficheiro meteorológico e o transcrevesse para um dos formatos acima citados. O formato seleccionado foi o CD144 (ANEXO V).

A utilização deste tipo de formato de dados de superfície é feita com base nalgumas suposições. Deste modo:

- O cálculo da classe de estabilidade é baseado na velocidade do vento, altura do tecto de nuvens, cobertura nebulosa, ângulo solar e hora do dia;
- O expoente do perfil de vento é baseado na classe de estabilidade;
- O perfil de humidade é obtido com base na assumpção que o gradiente do ponto de orvalho é igual ao gradiente de temperatura seca.

Os dados de altura de camada de mistura estão presentes no ficheiro MIXHT.TAP. Este ficheiro apresenta dois valores correspondentes aos valores de altura de camada de mistura durante a manhã e a tarde. Durante o programa de cálculo (PREPROCESSOR) é feita a interpolação dos valores para uma base horária. O procedimento para elaboração deste tipo de ficheiros está apresentado no ANEXO VI.

Tem igualmente de ser feita a introdução de dados relativos à torre de refrigeração, assim como outros dados necessários ao cálculo dos demais resultados. São esses:

- Tipo de torre de refrigeração em análise;
- O formato dos dados meteorológicos;
- Latitude e longitude do local em estudo;
- Comprimento de rugosidade (cm)
- Altura de referência dos dados meteorológicos;
- Diâmetro efectivo de saída;
- Altura da(s) torre(s) de refrigeração;
- Potência dissipada;
- Caudal de ar de entrada;
- Índice de claridade mensal (*monthly clearness index*);
- Insolação média mensal;

As características de cada um dos ficheiros de entrada relativos às características da fonte e opções de cálculo encontram-se descritas em Policastro *et al.* (1987).

5.2.3. Dados de saída

O modelo apresenta como informação de saída:

- Comprimento, altura e raio máximos do penacho previsto;
- O cálculo da massa de água emitida (primagem) e deposição salina;
- Cálculo da formação de nevoeiro/gelo ao nível do solo;
- Diminuição da intensidade de radiação solar directa;
- Efeito de sombra por parte da pluma.

Estas informações encontram-se compiladas no ficheiro TABLES.OUT, descrito no ANEXO III.

6. APLICAÇÃO DOS MODELOS SACTI E SIAPTR À CENTRAL DO CARREGADO

6.1. *Análise comparativa*

Tendo sido usado o modelo SIAPTR no estudo de impacto ambiental aquando da construção da central térmica do Carregado, procurou comparar-se os resultados do modelo SACTI face aos que já tinham sido obtidos.

Foi usada a informação meteorológica disponível, no formato de radiossondagens referentes a períodos do nascer do Sol, no Inverno e no Verão; os dados meteorológicos só estavam disponíveis para uma altura superior a 70 metros, uma vez que só se realizaram medições acima da altura da torre de refrigeração.

6.1.1. Dados da central

A central térmica do Carregado apresenta um conjunto de 6 grupos de potência unitária de 125 MW, possuindo uma torre de refrigeração de tiragem induzida, para 2 grupos.

Tabela 3. Dados da fonte

Nº de torres	Altura (m)	Diâmetro de saída (m)
1	70	55

6.1.2. Modelo SIAPTR

Na aplicação do modelo SIAPTR a este caso de estudo, não se dispunha de informação meteorológica no formato informático. Perante esta situação, e como apenas se tratavam de duas situações, optou-se por fazer a entrada destes via consola. Foi considerado um raio inicial de penacho igual ao raio de saída da torre de refrigeração, e uma temperatura de saída de penacho superior à temperatura ambiente 15 °C. A velocidade de saída, foi

estimada como 3 m.s^{-1} . Os valores referentes ao teor de água tipo nuvem e hidrometeoro foram de $0,0005 \text{ g.g}^{-1}$ para ambas as quantidades, sendo estes os valores existentes na literatura, resultantes da medição em várias campanhas experimentais (Carhart e Policastro, 1991).

6.1.3. Modelo SACTI

Na aplicação deste modelo, verificou-se que não se possuíam todos os dados de entrada necessários para o modelo SACTI. Deste modo, para além dos parâmetros meteorológicos que não estavam disponíveis e que foram calculados, considerou-se uma diferença de temperatura entre o penacho e a atmosfera de $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma velocidade de saída de 3 m.s^{-1} .

A altura de camada de mistura foi determinada com base nas radiossondagens disponíveis, tendo-se ainda realizado a análise de sensibilidade do modelo face a este parâmetro. A altura de camada de mistura obtida foi de 100 metros para o Inverno e 300 metros para o Verão (ANEXO VIII).

6.1.4. Apresentação dos resultados

Os resultados estimados das dimensões de penachos estão apresentados nas Figuras 19 e 20.

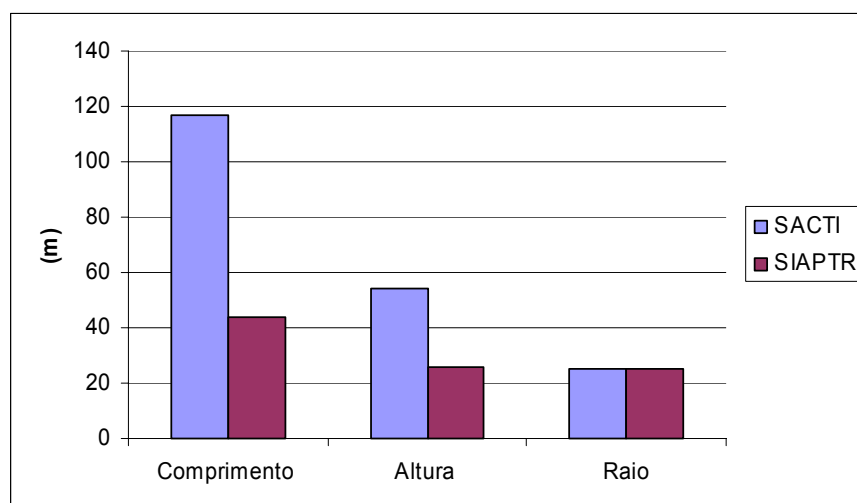


Figura 19. Análise comparativa das dimensões dos penachos pelos dois modelos numa situação típica de Verão.

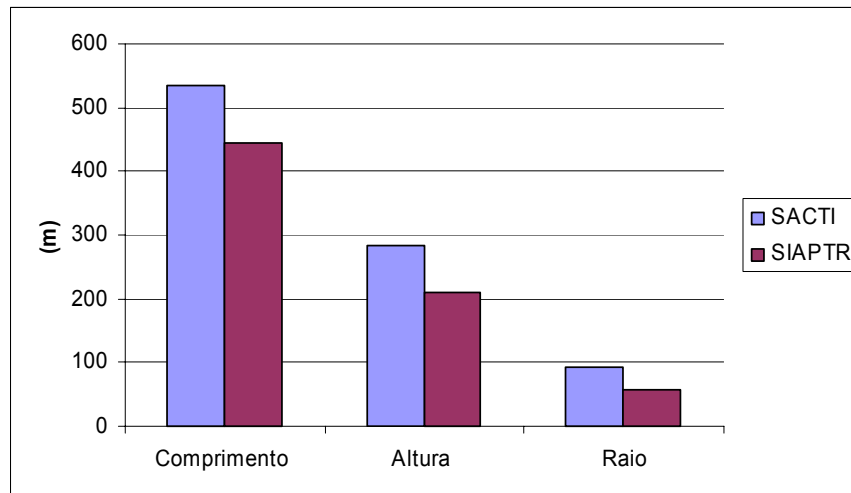


Figura 20. Análise comparativa das dimensões dos penachos pelos dois modelos numa situação típica de Inverno.

Da análise das Figuras 19 e 20, verifica-se que ambos os modelos prevêem o mesmo tipo de penachos – curtos no Verão e médios no Inverno, segundo a classificação de Borrego *et al.* (1987). Os resultados mostraram, em ambos os casos, uma sobre-estimativa do SACTI face ao SIAPTR.

Na situação de Verão, o SACTI prevê maior dimensão de penachos do que o SIAPTR. Das avaliações prévias ao SACTI, foi identificada uma ligeira tendência para este sobre-estimar penachos de reduzida dimensão, casos em que os erros na previsão são mais aceitáveis (Policastro *et al.*, 1984). É reconhecida esta limitação do modelo e que permite explicar a disparidade que existe para a situação de Verão, entre o comprimento e a altitude de pluma previsto pelos dois modelos.

Na estação de Inverno (Figura 20), o SACTI estima penachos de maiores dimensões do que o SIAPTR com uma diferença absoluta aproximada de 90, 74 e 34 metros, para os parâmetros de comprimento, altura e raio de penacho, respectivamente. Nesta análise é necessário salientar que os resultados do SIAPTR apresentavam um teor de água líquida, pelo que é expectável uma persistência do penacho na atmosfera, correspondendo a uma situação na qual o penacho se confunde com o fundo nebuloso. Por outro lado, como o SACTI só termina o processo de cálculo quando toda a água líquida se evaporar, é compreensível que resultados sejam de dimensões mais elevadas.

Salienta-se ainda a inexistência de dados experimentais para avaliar estas simulações, o que impede a elaboração de conclusões quanto à exactidão dos resultados obtidos.

Relativamente à influência da altura de camada de mistura no cálculo das dimensões do penacho, os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4 e 5. A incerteza da determinação deste parâmetro apenas é avaliada para o SACTI, pois o SIAPTR faz a introdução de dados com base radiossondagens, não sendo utilizado neste último o conceito de altura de camada de mistura.

Tabela 4. Apresentação da comparação dos resultados obtidos para a situação de Verão

	SACTI		
Altura de camada de mistura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)
800	117	54	25
400	117	54	25
300	117	54	25

Tabela 5. Apresentação da comparação dos resultados obtidos para a situação de Inverno

	SACTI		
Altura de camada de mistura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)
300	1173	394	195
200	549	304	118
150	535	285	92
100	535	285	92

Das tabelas apresentadas, verifica-se que a altura de camada de mistura na situação de Verão, não afecta as dimensões do penacho para as condições meteorológicas registadas. É verificável que um aumento da altura de camada de mistura para a situação de Inverno provoca um aumento considerável das dimensões do penacho.

Testando a sensibilidade dos modelos SACTI e SIAPTR à velocidade do escoamento à saída da torre – parâmetro importante para o cálculo quer do caudal de entrada de ar, e consequentemente da potência dissipada no SACTI – fizeram-se novas simulações

considerando uma velocidade de saída de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Desta análise resultaram os valores da dimensão de pluma apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Apresentação do cálculo das dimensões dos penachos pelo SIAPTR, considerando uma velocidade de saída de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,0 \text{ m.s}^{-1}$

	SIAPTR ($v=2,5 \text{ m.s}^{-1}$)			SIAPTR ($v=3,0 \text{ m.s}^{-1}$)		
Situação	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)
Verão	44	23	23	44	26	25
Inverno	449	204	56	445	211	58

Na Tabela 6 constata-se que uma diminuição da velocidade de saída do ar em $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ no SIAPTR, exerce uma influência relativamente baixa nos resultados, referentes quer à estação de Verão, quer à de Inverno. É ainda observável que com o aumento da velocidade de saída, o penacho atinge uma maior altitude e um raio mais elevado, com uma diminuição do comprimento máximo atingido.

Tabela 7. Apresentação do cálculo das dimensões dos penachos pelo SACTI, considerando uma velocidade de saída de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,0 \text{ m.s}^{-1}$

	SACTI ($v=2,5 \text{ m.s}^{-1}$)			SACTI ($v=3,0 \text{ m.s}^{-1}$)		
Situação	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)	Comprimento (m)	Altura (m)	Raio (m)
Verão	110	47	23	117	54	25
Inverno	497	272	88	536	285	92

Da Tabela 7 constata-se que uma diminuição da velocidade de saída de apenas $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ provoca uma atenuação das dimensões do penacho superior a 5% para as situações analisadas. Desta forma, verifica-se que este parâmetro exerce uma influência que pode ser significativa para o cálculo final das características da pluma neste modelo.

No capítulo 1.1.1 refere-se que um aumento da velocidade de escoamento do ar no interior da torre de refrigeração implica uma maior taxa de dissipação de energia, o que conduzirá a penachos de maiores dimensões. Esta ocorrência foi observada em ambos os modelos, existindo uma diferença a salientar. Na análise efectuada com o SACTI verifica-se que

todas as componentes do penacho aumentaram de dimensão, ao passo que no SIAPTR o aumento de velocidade de saída da torre de refrigeração, resultou num aumento do raio e da dimensão vertical do penacho, mas numa ligeira diminuição do seu comprimento. Esta situação acontecerá provavelmente devido a dois motivos – à diferente forma como os modelos estimam a componente horizontal da quantidade de movimento do penacho e à forma de fecho de cálculo do SACTI e do SIAPTR. Enquanto que o SACTI considera que a componente de velocidade horizontal do efluente iguala a velocidade do vento, o SIAPTR não faz esta suposição; consequentemente, os penachos calculados pelo SACTI apresentam maior horizontalidade. Adicionalmente, o SACTI só termina o processo de cálculo quando toda a água líquida se evaporar, ao passo que o SIAPTR finaliza quando a quantidade de movimento do penacho se não diferenciar do ambiente atmosférico. Como o SACTI considera então uma maior advecção do penacho, os resultados obtidos são mais elevados.

6.2. Aplicação do SACTI

A análise aqui realizada pretende sobretudo demonstrar as capacidades do SACTI na previsão de vários impactes ambientais de torres de refrigeração, além das dimensões de penacho. São ainda apresentados os resultados obtidos com base no módulo de representação gráfica desenvolvido no âmbito deste trabalho.

Tendo o modelo SACTI sido concebido para avaliar o impacte de uma torre/parque de torres, numa base anual, fez-se a simulação dos penachos de uma das torres de refrigeração da central do Carregado usando-se os valores meteorológicos registados no ano de 2001.

O ficheiro meteorológico foi tratado tendo em vista a obtenção dos dados meteorológicos em falta. Os valores de altura de camada de mistura foram obtidos por recurso ao modelo meteorológico TAPM. O TAPM – *The Air Pollution Model*, desenvolvido pelo CSIRO – *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* – estima os parâmetros meteorológicos importantes, tais como brisas de mar, a partir de uma base de dados de larga escala proveniente de análises sinópticas. Este modelo resolve a equação da quantidade de movimento para a componente horizontal do vento, a equação da

continuidade de um fluido incompressível para a componente vertical e equações escalares para a temperatura e humidade específica (Hurley *et al.*, 2001). Este modelo tem a sua aplicação validada para o domínio de Portugal Continental, revelando bons resultados nas simulações realizadas (Ribeiro, 2005).

Os dados de cobertura nebulosa foram obtidos com recurso às medições feitas na Estação de Gago Coutinho, em Lisboa, com uma frequência de 3 horas, sendo este o local mais próximo do Carregado com esta informação disponível. A informação relativa ao índice de claridade mensal e valores médios mensais de insolação foram obtidos por consulta de um atlas de radiação solar (Palz e Greif, 1996).

Foi ainda realizado o estudo relativo à quantidade de deposição salina passível de ocorrer. Contudo, como este parâmetro está dependente do caudal de água de refrigeração e este se não encontrar disponibilizado, optou-se por adoptar os valores sugeridos pelo SACTI. Considerou-se um espectro de emissão de gotas constituído por 31 classes de diâmetros, um caudal de emissão de $171,36 \text{ g.s}^{-1}$, um teor de sal de $0,005 \text{ g (sal).(g (solução))}^{-1}$ e uma massa volúmica de sal de $2,17 \text{ g.cm}^{-3}$. Na Figura 21 está apresentada a distribuição de diâmetros de gotas utilizado.

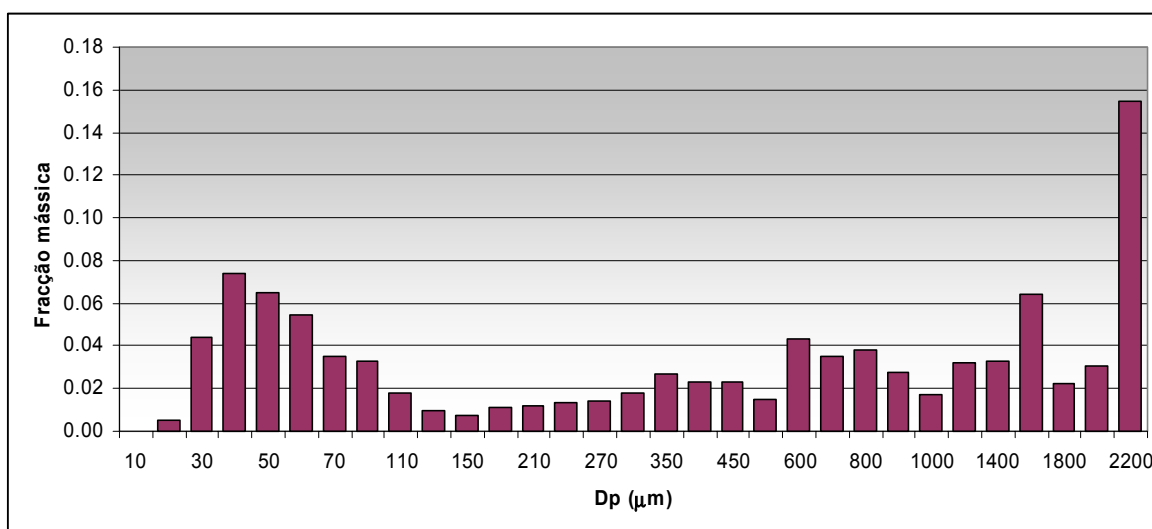


Figura 21. Distribuição do diâmetro de gotas considerado no SACTI.

Estimou-se ainda a potência dissipada e o caudal de ar de entrada uma vez que estes dados não estavam disponíveis; o cálculo foi realizado com base no balanço mássico e térmico da torre de refrigeração. O valor da potência dissipada foi calculado para a situação meteorológica mais adversa para a eficiência da torre, correspondente à situação de Verão. De acordo com Cheremisonoff e Cheremisonoff (1983), os valores de potência dissipada e caudal de ar de entrada devem ser calculados para o percentil 95 da temperatura de bolbo húmido na estação de Verão. Assumiu-se com base em Borrego *et al.*, 1987, um diferencial de temperatura de efluente e do ar ambiente de 15 °C. O procedimento de cálculo está apresentado no ANEXO VII, tendo-se desenvolvido uma folha de cálculo específica para este efeito.

A análise dos resultados obtidos foi feita, tendo em atenção as estações do ano e o ano inteiro. As representações foram obtidas por recurso ao *software* SURFER 8.0, tendo sido preparado um programa em FORTRAN que permitisse a reformatação dos dados de saída do SACTI (ANEXO IX).

6.2.1. Estação de Inverno

Descrição meteorológica do período de Inverno

O período de Inverno apresentou uma humidade média relativa de 67%. A temperatura média registada foi de 12 °C. Os dados meteorológicos estão apresentados nas Figuras 22 e 23. Quanto à direcção de vento registou-se um predomínio das direcções de Noroeste e Sudoeste (Figura 24). A estação de Inverno considerada abrangeu o período correspondente entre os dias 1 de Janeiro e 20 de Março de 2001 e os dias 21 a 31 de Dezembro de 2001.

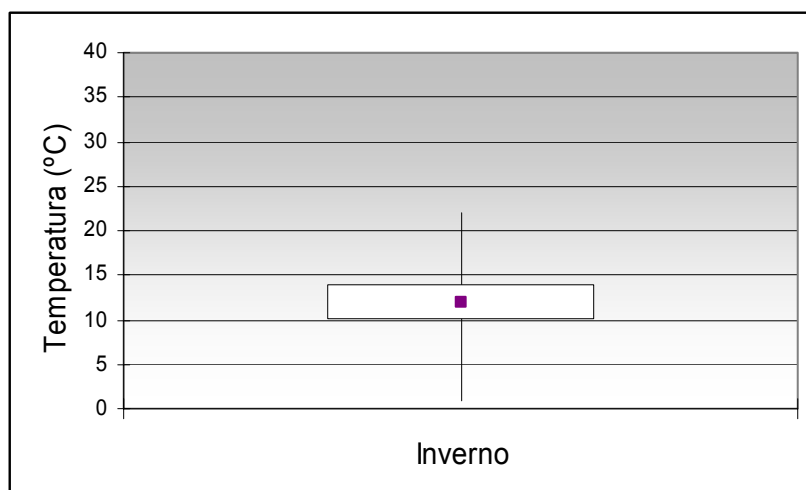


Figura 22. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

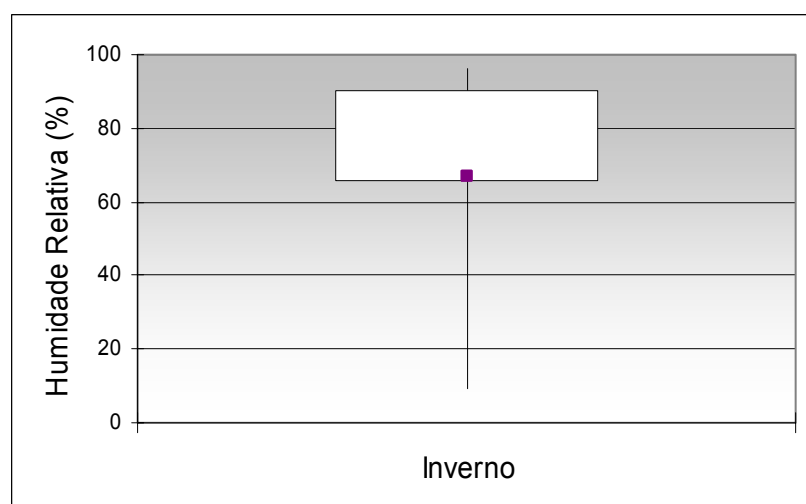


Figura 23. Apresentação dos valores de humidade relativa mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

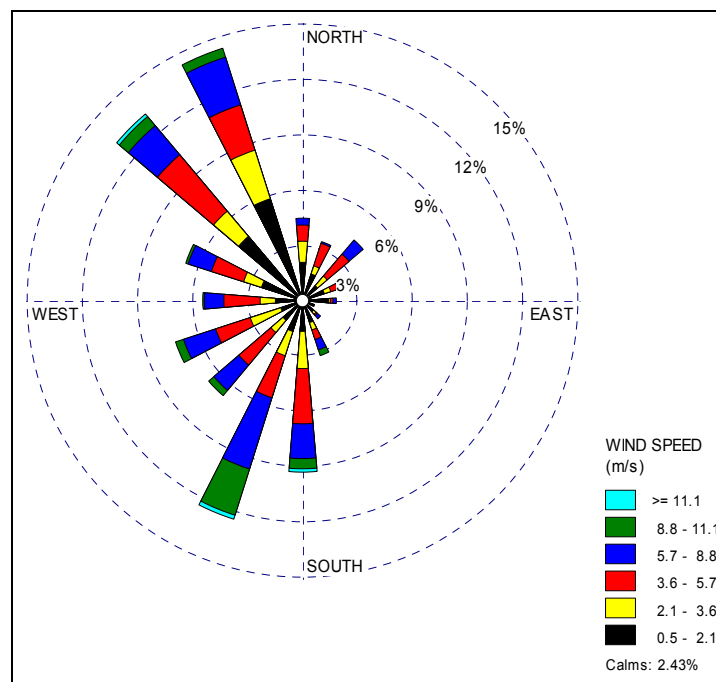


Figura 24. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Inverno.

Apresentação dos resultados para o período de Inverno

Os resultados obtidos pelo SACTI, relativamente aos comprimentos de penachos previstos, estão apresentados na Figura 25.

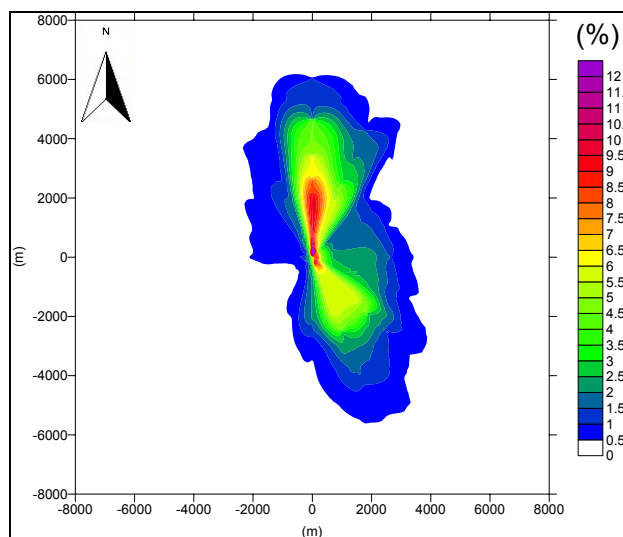


Figura 25. Distribuição do comprimento de penacho segundo as várias direcções.

Esta forma de representação, permite constatar quais os quadrantes em relação à torre de refrigeração onde predomina a ocorrência de penacho. Para esta situação nota-se uma maior predominância de penacho nas direcções Norte e Sudeste, o que seria expectável face às direcções de vento dominantes para este período de tempo, verificando-se a existência de penacho visível até uma distância de 6000 metros da fonte emissora. A análise dos resultados mostra que o comprimento máximo de penacho calculado a nível anual é muito superior ao apresentado na Tabela 5. Contudo estas ocorrências são verificáveis em menos de 2% do ano.

Na Figura 26 estão apresentados os valores de altura de penacho previsto pelo SACTI na aplicação ao caso do Carregado para esta estação.

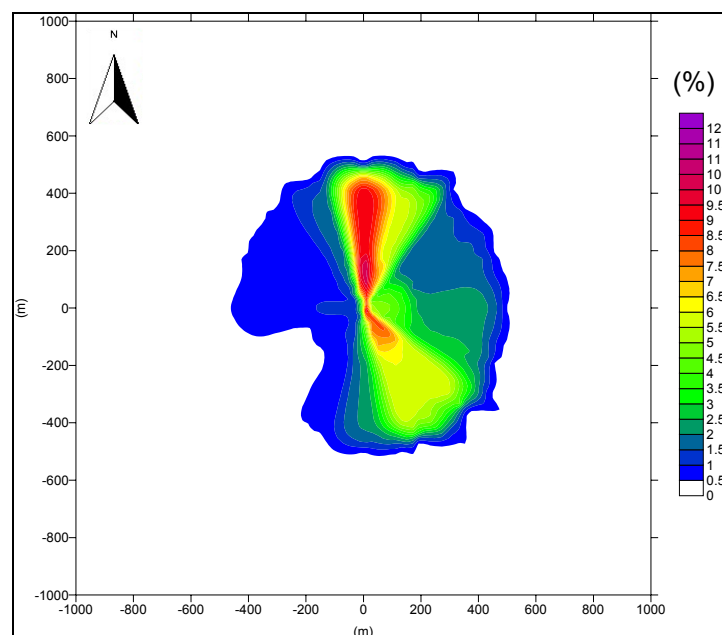


Figura 26. Distribuição de altura dos penachos na estação de Inverno.

Com base na Figura 26, é possível apurar que 9 % dos penachos ocorrem a Norte da torre, possuindo uma altura aproximada de 400 metros. Verifica-se igualmente que não estão previstos penachos com uma altura superior a 600 metros.

Uma das vantagens do modelo SACTI é a capacidade do modelo conseguir prever outros impactes das torres de refrigeração, para lá do impacte visual causado pela presença de penacho.

Deste modo, na Figura 27 está apresentado o número total de horas de sombra por direcção de vento e distância à fonte associada à presença de penacho.

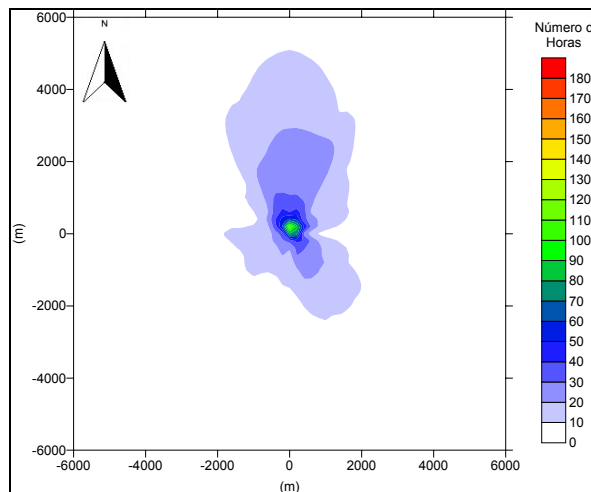


Figura 27. Número de horas de sombra causada pela presença de penacho na estação de Inverno.

Da Figura 27 percebe-se que as zonas mais afectadas pela presença de sombra serão as áreas a Norte e Sudeste da torre de refrigeração, registando um valor mínimo de 10 horas de sombra causada pela presença de penacho até uma distância de 5000 metros.

A quantidade de deposição salina que poderá ocorrer na área em redor à central térmica, está resumida na Figura 28.

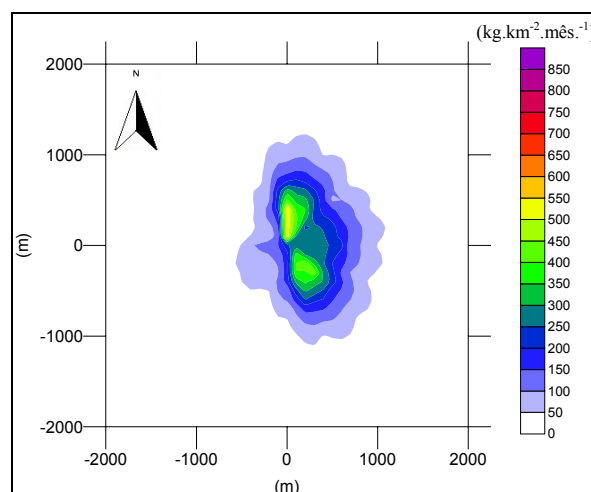


Figura 28. Massa de sal depositada na área em redor à central térmica na estação de Inverno.

Na Figura 28, verifica-se que as áreas mais afectadas se localizarão a Norte e a Sul da central térmica, com valores máximos de $500 \text{ kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$ até uma distância de 500

metros a Norte da torre de refrigeração. Nesta figura constata-se ainda que a distância afectada pelas emissões da torre ronda os 1000 metros. Com base nos dados do ANEXO X, verifica-se que o valor máximo calculado poderá provocar dano na vegetação mais sensível que possa existir.

6.2.2. Estação de Verão

Descrição meteorológica do período de Verão

O período de Verão apresentou uma humidade relativa média de 60%, e a temperatura média registada foi de 21 °C. Os dados meteorológicos estão apresentados nas Figuras 29 e 30. Quanto à direcção de vento registou-se um predomínio da direcção de Noroeste (Figura 31), sendo expectável que a ocorrência de penachos no quadrante Sudeste da torre de refrigeração. A estação de Verão abrangeu o período de 21 de Junho a 21 de Setembro de 2001.

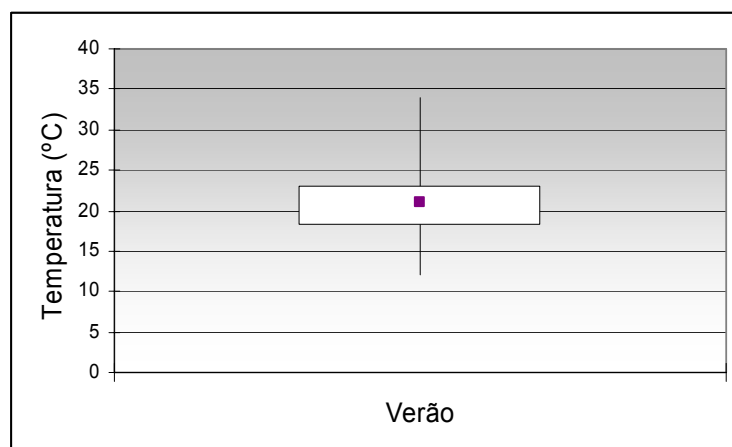


Figura 29. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

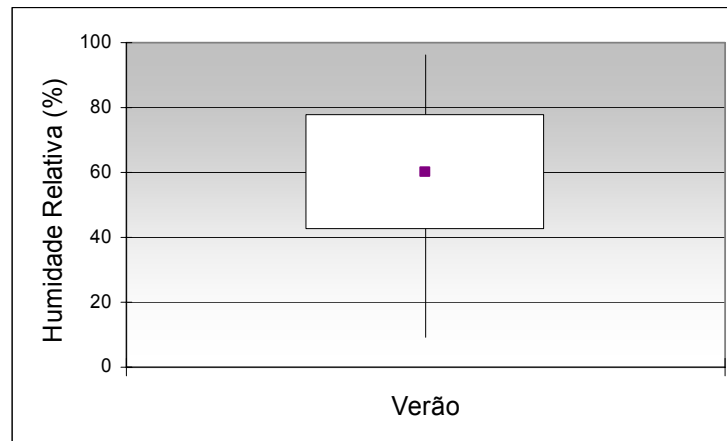


Figura 30. Apresentação dos valores de humidade relativa mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Inverno. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

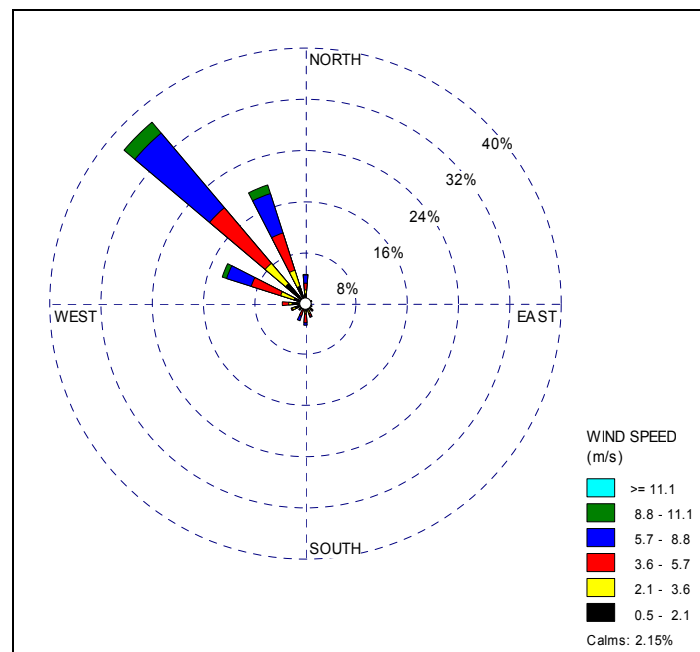


Figura 31. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Verão.

Apresentação dos resultados para o período de Verão

Para as condições meteorológicas de Verão verifica-se, como se pode constatar na Figura 32, que os penachos apresentam na generalidade menor comprimento nesta estação do que no Inverno.

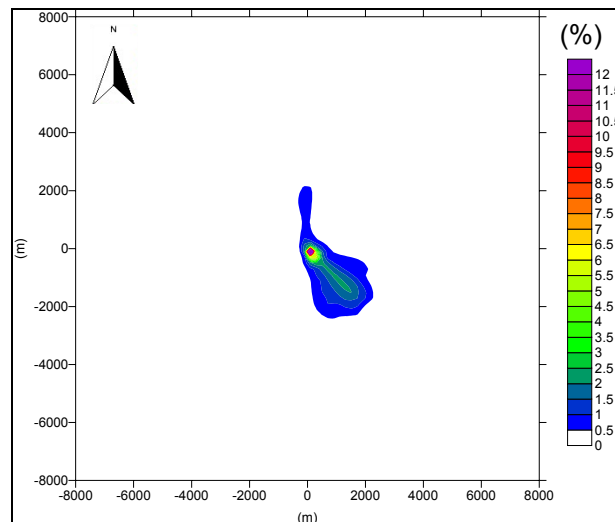


Figura 32. Distribuição do comprimento de penachos na estação do Verão.

Procedendo à representação gráfica da distribuição do comprimento de penacho por direcção de vento, verifica-se uma predominância de penachos de maiores dimensões no quadrante de Sudeste, tal como se nota na Figura 32. Nesta estação apenas 10% terão um comprimento superior a 600 metros.

Da previsão da altura prevista de penachos para esta estação, nota-se que esta será de menores dimensões, face à estação de Inverno; é ainda possível averiguar uma maior altitude atingida pelos penachos na direcção de Sudeste, conforme o apresentado na Figura 33.

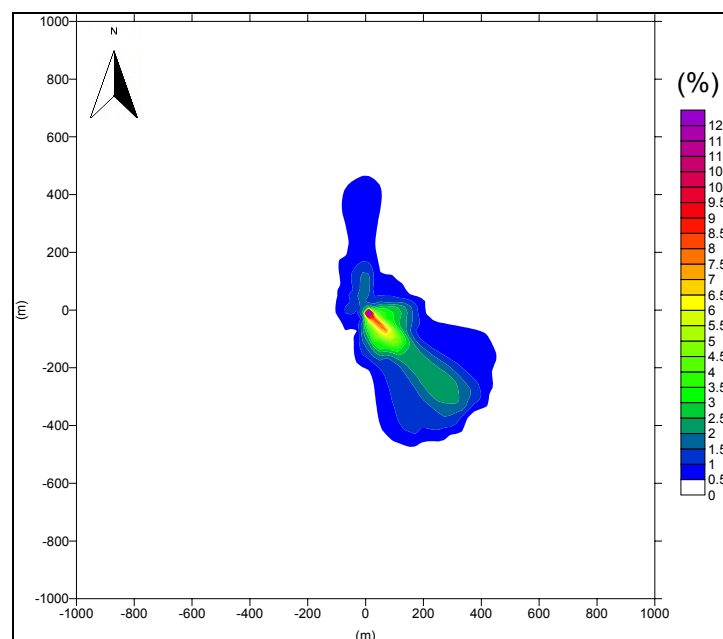


Figura 33. Distribuição de altura de penacho na estação do Verão.

O número de horas de sombra causadas pela presença de penacho está apresentado Figura 34.

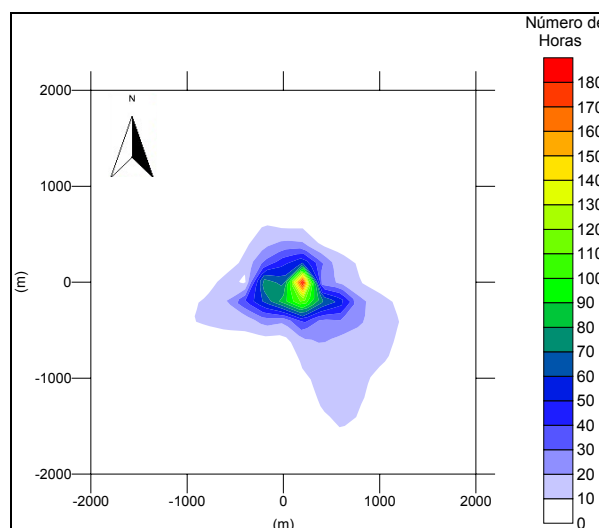


Figura 34. Número de horas de sombra na estação de Verão.

Contrariamente ao que se tinha observado na estação de Inverno, detecta-se agora que a área afectada se localizará a Sudeste da localização da torre de refrigeração, atingindo uma distância de 1500 metros, aproximadamente. Verifica-se igualmente que a zona mais prejudicada pela formação de sombra se encontra na envoltória da torre de refrigeração, até uma distância de cerca de 400 metros.

Relativamente à quantidade de deposição salina por quadrante, apresentada na Figura 35, verifica-se um acréscimo dos valores de deposição salina no Verão face à estação de Inverno, obtendo-se um resultado máximo de $850 \text{ kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$ na zona Sudeste à torre de refrigeração; constata-se ainda que a área afectada se estende até uma distância de 3600 metros. Esta situação identifica claramente, com base no ANEXO X, possíveis impactes significativos passíveis de ocorrerem relacionados com a deposição salina a Sudeste da torre de refrigeração.

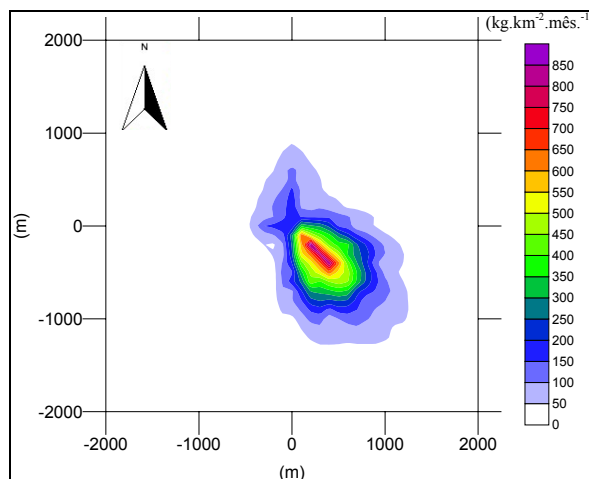


Figura 35. Quantidade de deposição salina na estação de Verão.

6.2.3. Análise a nível anual

Descrição meteorológica do ano de 2001

O ano de 2001, segundo a modelação realizada pelo TAPM, apresentou uma humidade relativa média de 60%, e a temperatura média registada foi de 16 °C. Os dados meteorológicos estão apresentados nas Figuras 36 e 37. Quanto à direcção de vento registou-se um predomínio da direcção de Noroeste; as direcções de Sul/Sudoeste também apresentaram alguma relevância (Figura 38). Neste caso é expectável que os penachos ocorram sobretudo no quadrante Sudeste da torre de refrigeração.

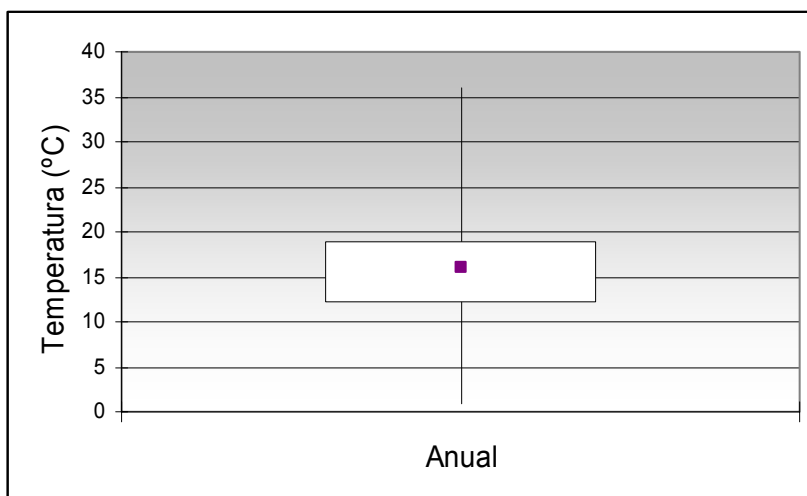


Figura 36. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

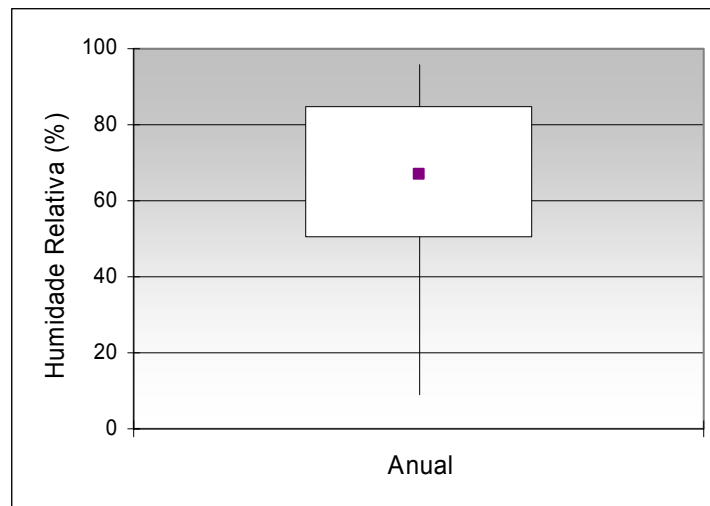


Figura 37. Apresentação dos valores de temperatura mínima, percentil 25, percentil 75 e máxima para a estação de Verão. O quadrado a roxo representa a temperatura média.

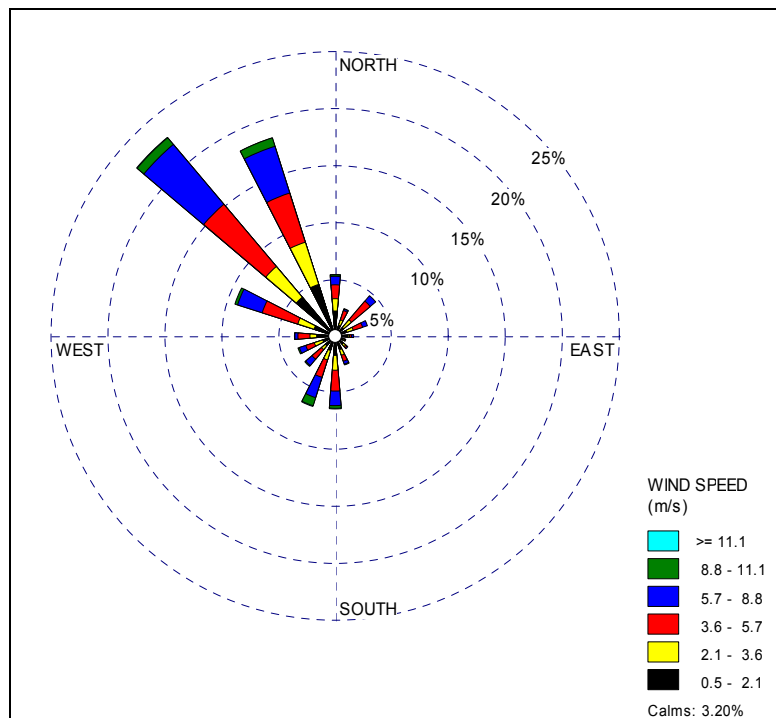


Figura 38. Apresentação das direcções e velocidades de vento para o período de Verão.

Com esta análise pretende-se realçar qual o impacte que a torre de refrigeração pode ter a um nível anual.

Apresentação dos resultados para o ano de 2001

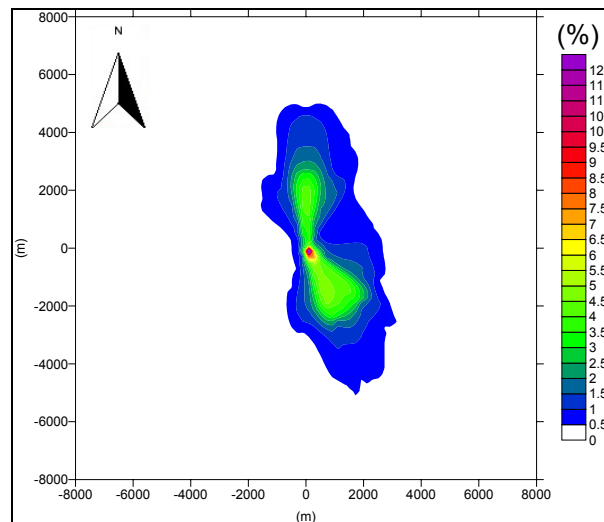


Figura 39. Função de distribuição de comprimento de penacho a nível anual.

À semelhança da situação de Inverno, as maiores dimensões de penacho registam-se para as direcções de Norte e Sudeste, registando-se para cerca 2% dos valores simulados um comprimento aproximado de 5000 metros.

De seguida, na Figura 40, é apresentada a distribuição de altura de penachos para o ano de 2001.

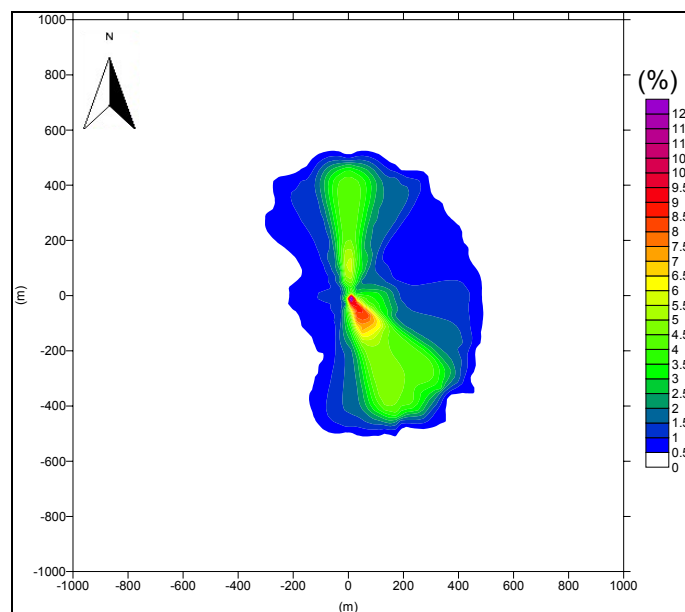


Figura 40. Distribuição de altura de penacho a nível anual.

Da Figura 40, constata-se uma predominância dos penachos nas direcções Norte e Sudeste, tal como para a distribuição de comprimento de penacho, sendo simuladas alturas máximas de penacho de 500 metros em 6% dos casos em estudo.

Na Figura 41 está apresentado o número de horas de sombra originado pela presença de penacho.

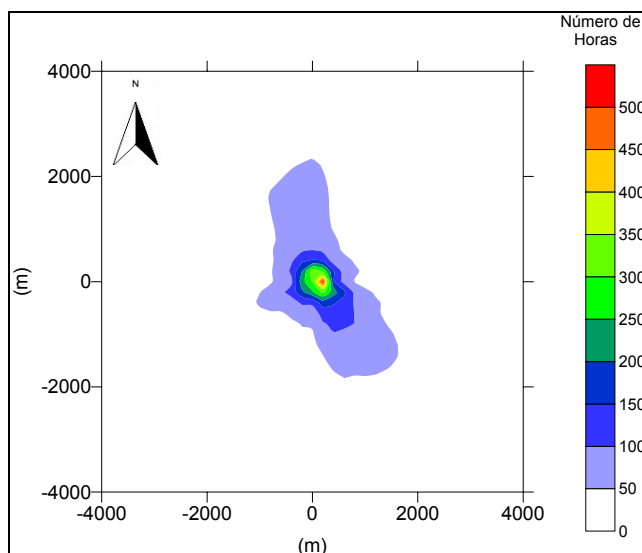


Figura 41. Número de horas de sombra causado pela presença de penacho no ano de 2001.

A figura anterior mostra que o valor máximo de horas de sombra se localiza nas imediações da torre de refrigeração, com um valor que ronda as 500 horas, sendo que as áreas mais afectadas se localizam a Norte e Sudeste da torre de refrigeração, a uma distância máxima de 2000 metros.

Na Figura 42, estão apresentadas as quantidades de deposição salina por direcção de vento e distância à fonte de emissão. Da Figura 35 é possível apurar que o maior valor se regista para as proximidades da fonte emissora, com cerca $600 \text{ kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$. Constata-se que a zona a Sudeste da torre de refrigeração apresenta valores de deposição salina superiores a $400 \text{ kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$, representado potencial dano em espécies vegetais mais sensíveis, de acordo com o Anexo X.

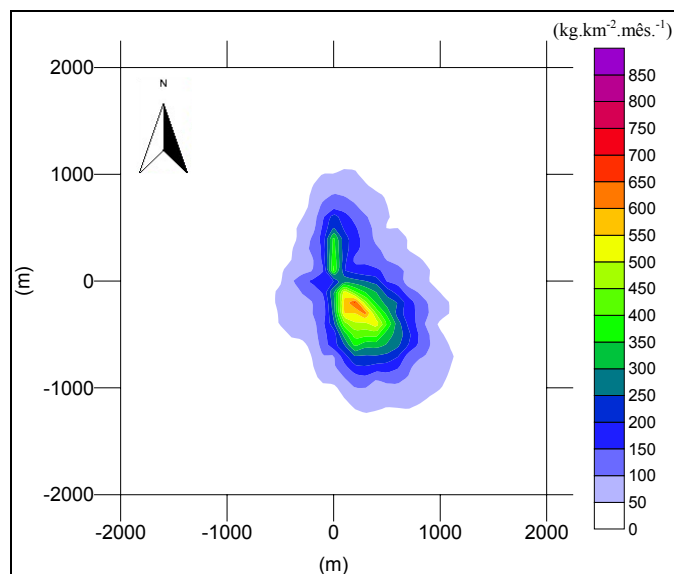


Figura 42. Quantidade de deposição salina no ano de 2001.

Foi ainda possível constatar que não foi previsto qualquer caso de formação de nevoeiro/gelo originados pelo penacho a nível do solo.

6.2.4. Conclusões finais

A análise de nível anual pretende, como já referido, demonstrar as capacidades do SACTI na aplicação a um espaço temporal alargado, neste caso o ano de 2001 e estações de Inverno e Verão. Os resultados indicam penachos com comprimento superior a 2000 metros, sobretudo na estação de Inverno. Estes valores podem apresentar-se ligeiramente sobre-estimados, devido a um excessivo valor de potência dissipada pelas torres de refrigeração na estação de Inverno. De facto, a quantidade de energia dissipada por uma torre de refrigeração é dimensionada para a estação de Verão, quando a temperatura ambiente é mais elevada, sendo necessário a torre de refrigeração dissipar maior quantidade de energia para manter a água de refrigeração o mais fria possível. Na estação de Inverno, como a temperatura ambiente é menor, é prática em algumas torres de refrigeração diminuir o caudal de água a refrigerar, resultando numa menor potência dissipada (Cheremisinoff e Cheremisinoff, 1983); contudo o SACTI mantém constante o valor de potência dissipada ao longo do ano, calculando a temperatura de saída do penacho para cada categoria. Desta forma, os penachos de Inverno apresentam-se ligeiramente

sobre-estimados. Esta metodologia de cálculo garante uma abordagem conservadora do impacto ambiental das torres de refrigeração, que na realidade corresponderá a dimensões de penachos menores.

A qualidade dos resultados relativos à quantidade de deposição salina é prejudicada pela ausência de informação relativa ao caudal de água líquida, assim como o espectro de diâmetros de gotas constituintes da primagem. O conhecimento destes dois parâmetros é muito importante (Policastro *et al.*, 1994), pelo que a análise aqui realizada apenas pretende ser meramente indicativa.

7. APLICAÇÃO DOS MODELOS SACTI E SIAPTR À CENTRAL TÉRMICA EM PONFERRADA

De modo a comparar de melhor forma os resultados entre o SACTI e o SIAPTR realizou-se, com ambos os modelos, a simulação dos penachos das torres de refrigeração da central térmica de Compostilla II (Ponferrada, Espanha). Para este local existia, associada à presença de informação meteorológica, a caracterização dos penachos visíveis. Os dados utilizados para este estudo foram os medidos com vista à validação do SIAPTR, em 1987 (Borrego *et al.*, 1990b).

Esta análise permitiu ainda avaliar o desempenho do modelo SACTI para configurações multi-torre, face a dados medidos.

7.1. Dados da central

A central de Compostilla II, apresentada na Figura 43, é uma central que apresenta uma potência máxima de 1300 MW. Os dois últimos grupos instalados possuem uma potência unitária de 350 MWe, existindo uma torre de refrigeração de tiragem natural para cada grupo. Na Tabela 8, estão apresentadas as características das torres de refrigeração.



Figura 43. Fotografia da central de Compostilla II, em Ponferrada, Espanha [url 5]

Tabela 8. Dados da fonte

Nº de torres	Altura (m)	Diâmetro de saída (m)	Distancia inter-torres
2	111	50,3	125,75

É ainda de salientar que as duas torres de refrigeração apresentam face à direcção Norte um desvio de 115°.

7.2. Informação meteorológica

Existiam 25 ficheiros meteorológicos resultantes da campanha experimental levada a cabo em Ponferrada (Borrego *et al.*, 1990b), estando documentadas as dimensões de penachos dos penachos correspondentes.

Na presente análise foi atribuído a cada registo um número de ordem compreendido entre 1 e 25; esta informação está apresentada no ANEXO XI.

7.2.1. Modelo SIAPTR

Este modelo requer como dados de entrada, para além da informação meteorológica da estrutura vertical da atmosfera (radiosondagem), os dados relativos aos teores iniciais de água tipo nuvem e hidrometeórica no penacho. Para tal, recorreu-se a valores de literatura, uma vez que não foi possível fazer a medição destes parâmetros, durante o decurso da campanha experimental. O valor escolhido foi $0,0005 \text{ g.g}^{-1}$ para ambas as quantidades (Carhart e Policastro, 1991).

7.2.2. Modelo SACTI

A análise realizada com o SACTI começou pela preparação dos ficheiros meteorológicos, usando-se o formato CD-144. Para tal, foram usados os dados meteorológicos obtidos junto à saída das torres de refrigeração, o que correspondeu ao primeiro nível das

radiossondagens disponíveis. Para estes dados foram calculados os parâmetros meteorológicos em falta através de fórmulas existentes na bibliografia.

Os dados de altura de camada de mistura foram determinados com base nas radiossondagens existentes para esse período de tempo. Esses valores estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de altura de camada de mistura determinados

Número do registo	Altura da camada de mistura (m)	Número do registo	Altura da camada de mistura (m)
1	400	13	130
2	400	14	130
3	400	15	130
4	400	16	130
5	400	17	130
6	400	18	130
7	400	19	130
8	400	20	160
9	400	21	160
10	200	22	160
11	130	23	160
12	130	24	160
		25	160

Como se estava perante uma situação com duas torres de refrigeração, foi ainda feita a selecção das direcções de vento representativas para a simulação do penacho.

As direcções de vento representativas escolhidas foram de 25,0°, 47,5°, 70,0° 92,5° e 115,0°, sendo depois estas direcções relacionadas com os outros quadrantes (Figura 44).

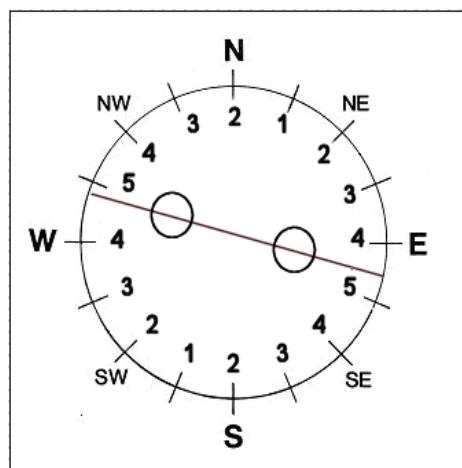


Figura 44. Representação esquemática da selecção das direcções de vento representativas.

Os valores fornecidos indicavam uma diferença de temperatura de 12,7 °C entre o ar ambiente e o efluente.

7.3. Apresentação de resultados

A apresentação dos resultados obtidos limitar-se-á apenas à comparação das dimensões observadas do penacho com os resultados estimados pelos dois modelos. Os cálculos referentes ao SIAPTR apresentam duas medições – penacho visível e penacho quantidade de movimento (q.d.m.).

É ainda de referir que as fotografias para os casos 14 e 16 foram tiradas de um ângulo diferente, pelo que a análise dos resultados obtidos para estas situações dimensões deve ser feita prudentemente; de facto, no caso 14, foi registado um comprimento de penacho de 0 metros, enquanto que nos casos 15 e 16 obteve-se um valor de 200 metros. Conforme o apresentado no ANEXO XI, as situações compreendidas entre o caso 14 a 16, inclusive, têm um espaçamento temporal de 7 minutos, pelo que o valor do comprimento da pluma no caso 14 deveria rondar os 200 metros; por esta razão, optou-se por não considerar a análise do comprimento de penacho correspondente a este registo.

Nas Figuras 45 e 46 estão apresentados os resultados obtidos para o comprimento e altura de penacho.

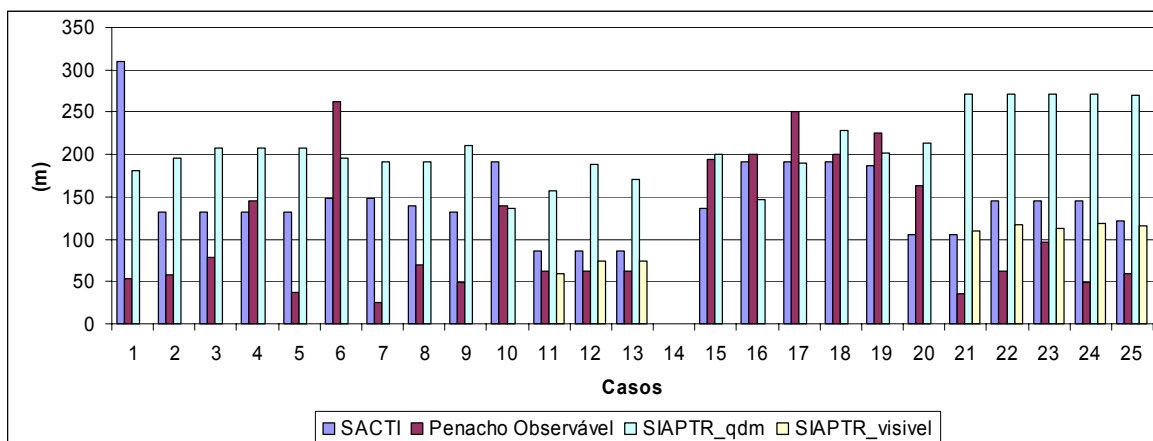


Figura 45. Apresentação da comparação dos comprimentos previstos pelos modelos face aos valores reais.

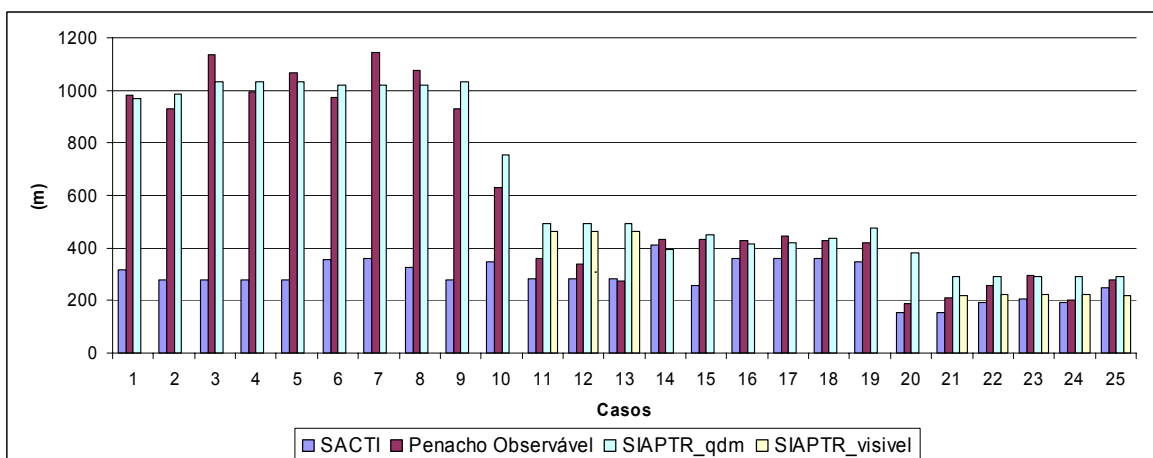


Figura 46. Apresentação da comparação das alturas dos resultados previstos pelos modelos face aos valores reais.

Da Figura 45, verifica-se que ambos os modelos nos casos de 1 a 9, com excepção do caso 6 e do caso 4 no caso de SACTI, apresentam na generalidade uma sobre-estimativa do comprimento dos penachos, sendo observável que o SACTI apresenta melhores resultados. Todavia, este modelo revela-se incapaz de prever a altura de penacho, apresentando uma diferença absoluta que ronda os 600 metros (Figura 46). Segundo Borrego *et al.* (1986), quando os ventos são fracos ou médios, existem numerosas provas em que os penachos saídos das torres de refrigeração sobem a alturas muitas vezes consideráveis. Ora das condições meteorológicas verificadas para o período em causa, salienta-se que a humidade relativa registada rondava os 85% e a velocidade de vento era relativamente baixa – cerca de 1 m.s^{-1} até aos 400 metros, sendo 2 m.s^{-1} aos 520 metros e $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ aos 720 metros; o perfil vertical de temperatura registado aproximava-se muito da neutralidade. Desta forma,

o modelo SACTI ao não incluir esta caracterização da atmosfera em altitude, revela-se incapaz de prever o comportamento deste tipo de penachos. A previsão da altura de penacho nos casos de 1 a 9 constitui a maior limitação identificável deste modelo para esta localização.

Relativamente ao caso 10, correspondente ao dia 18 de Novembro, verifica-se uma sobre-estimativa do SACTI face ao comprimento de penacho observado, enquanto que ocorre uma sub-estimativa da altitude de penacho observável.

Dos resultados obtidos para o dia 19 de Novembro (casos 11, 12 e 13) constata-se que ambos os modelos simulam com bastante fiabilidade os penachos observados, destacando-se os melhores resultados do SIAPTR para a simulação do comprimento de penacho, enquanto que o SACTI apresenta melhores resultados para a estimativa de altura.

Quanto aos casos compreendidos entre 15 e 25, referentes ao dia 20 de Novembro, é de salientar uma sobre-estimativa do comprimento de penacho pelo SACTI e pelo SIAPTR nos casos 21 ao 25. Quanto à previsão da altitude atingida pelos penachos nos casos 15 a 25, verifica-se um bom desempenho dos dois modelos, ocorrendo as maiores discrepâncias para o SACTI no caso 15 e para o SIAPTR no caso 20.

Determinou-se ainda a fracção de resultados da modelização que pertencem ao intervalo de factor de 2 face aos valores medidos (FAC2). Uma vez que os dois modelos são integrais e destinam-se a calcular as características médias dos penachos, o parâmetro FAC2 será o mais indicado na avaliação do desempenho dos modelos. Os resultados da análise estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados da análise estatística usando o parâmetro FAC2

Componente	SACTI	SIAPTR
FAC2 Comprimento	0,63	0,63
FAC2 Altura	0,64	1,00

Quanto maior for próximo de 1 for o valor de FAC2, melhor é o desempenho do modelo; assim, é verificável que o SIAPTR apresenta melhores resultados a análise da altitude

atingida pelos penachos, sendo que ambos os modelos apresentam um desempenho semelhante na previsão do comprimento de penachos.

8. CONCLUSÕES

Os modelos anteriormente apresentados, apesar de terem sido concebidos para a simulação de penachos provenientes de torres de refrigeração, apresentam metodologias de cálculo diferentes. Deste modo, os dados meteorológicos de entrada são distintos.

O SIAPTR, ao recorrer a informação meteorológica no formato de radiossondagens, permite uma caracterização mais detalhada dos níveis superiores da atmosfera; contudo, esta informação em Portugal é escassa, quer em locais de medição, assim como em resolução temporal. Perante uma situação em que se aplique este *software* a locais muito distanciados de pontos de medição de radiossondagens, ter-se-á que recorrer a informação meteorológica que poderá não ser representativa desse local, ou então será forçoso que se proceda à medição dos perfis verticais de temperatura, humidade e velocidade do vento da atmosfera.

Como referido anteriormente, o SACTI usa dados meteorológicos de superfície; geralmente existe maior disponibilidade destes dados, devido ao maior número deste tipo de estações meteorológicas, que usualmente apresentam medições com uma resolução temporal horária. Todavia, para se utilizarem estes dados, é necessário recorrer a extrapolações para alturas superiores, a fim de que o cálculo das propriedades do penacho seja possível. Porém, estas suposições nem sempre são fiáveis, como foi o caso na Figura 46, relativa à altura de penachos para Ponferrada. Outra limitação deste modelo refere-se à utilização do conceito de altura de camada de mistura, como caracterização da estrutura vertical da atmosfera. Esta medida não reflecte a existência de inversões de temperatura em altitude as quais podem originar “aprisionamentos” do penacho; adicionalmente a sua determinação nem sempre é livre de dúvidas. Este parâmetro tem de ser estimado com base em radiossondagens (por vezes distantes do local a analisar), ou então por recurso a modelos meteorológicos (p.e. TAPM). Conforme visível na Tabela 5, esta propriedade pode influenciar a qualidade dos resultados, em especial para penachos de maior dimensão.

Quanto à abrangência dos resultados fornecidos, verifica-se que neste aspecto o SACTI é superior ao SIAPTR; como tal, a caracterização do impacto ambiental pelo SACTI é mais completa. Salienta-se a presença de informação da quantidade de deposição salina,

fornecida pelo SACTI, o que constitui uma base para a quantificação do impacto do penacho sobre as estruturas na central térmica e consequente deterioração, mas também relevante para a previsão de danos que poderão ocorrer nas áreas envolventes à central térmica, como por exemplo, na agricultura e nos ecossistemas.

Relativamente aos resultados alcançados para a análise em Ponferrada, verificou-se um melhor comportamento do SIAPTR face ao SACTI na previsão de altitude de penacho, tendo ambos os modelos revelado um desempenho semelhante na previsão do comprimento de penacho. Contudo convém ter presente que foi a campanha de Ponferrada que permitiu a obtenção de valores para a validação do modelo SIAPTR; por outro lado, não se realizaram medições com velocidades de vento superiores a 5 m.s^{-1} , as quais poderiam originar o rebatimento de penacho. O SIAPTR só foi validado para torres de tiragem natural, não se conhecendo ainda o seu desempenho em torres de tiragem mecânica.

Realça-se, que o modelo SACTI foi validado com maior número de dados experimentais, para vários valores de razão de velocidade transversal (K), pelo que a sua comparação com o SIAPTR, só com base na campanha de Ponferrada, é limitada.

Da pesquisa realizada, conclui-se que o modelo SACTI apresenta uma maior flexibilidade, em especial, sendo capaz de simular penachos de torres de refrigeração de concepção diferente de tiragem natural, e apresentando um leque de dados de saída mais abrangente, constitui uma ferramenta mais eficaz do que o SIAPTR na previsão global dos impactos ambientais de torres de refrigeração do tipo húmido.

9. Bibliografia

Sítios da Internet

url 1 - www.gea.co.za/cooling%20towers.htm;

url 2 - <http://www.lenntech.com/cooling%20towers.htm>

url 3 - <http://www.specialized-mechanical.com/products/cooling-towers.html>

url 4 - <http://images.vertmarkets.com/crlive/files/Images/BAAF74C2-AFA2-11D4-8C75-009027DE0829/towerfan.jpg>

url 5 - <http://www.industcards.com/st-coal-spain.htm>

Literatura consultada

BECKER, B. (1979), *Cooling tower recirculation as influenced by the local atmospheric flow field, a numerical study*, A dissertation presented for the Doctor of Philosophy Degree, The University of Tennessee, Knoxville, 208 pp.

BORNOFF, R., MOKHTARZADEH-DEHGHAN, M. (2001) *A numerical study of interacting buoyant cooling-tower plumes*, Atmospheric Environment, Vol. 35, N. ° 3, pp. 589-598.

BORREGO, C., BARROS, N., CONCEIÇÃO, M. (1990a), *Modelização numérica do impacto atmosférico dum parque de torres de refrigeração – modelo SIAPTR*. AMB. QA-(3)/90, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

BORREGO, C., BARROS, N., CONCEIÇÃO, M. (1990b), *Modelização numérica do impacto atmosférico dum parque de torres de refrigeração – Validação do modelo SIAPTR*. AMB. QA-(4)/90, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

BORREGO, C., BARROS, N., COSTA, M. J., PIO, C. (1987), *Impacto atmosférico das torres de refrigeração*. AMB. QA-(3)/87, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

BORREGO, C., BARROS, N., COSTA, M. J., PIO, C. (1986), *Estudo dos penachos das torres de refrigeração atmosférica*. AMB. QA-(3)/86, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

BRENNAN, P., SEYMOUR, D., BUTLER, M., KRAMER, M., SMITH, M., THEODORE T. (1976), *The observed rise of visible plumes from hyperbolic natural draft cooling towers*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 10, N. 6, pp. 425-431.

BRIGGS, G. (1969) *Plume rise*, USAEC Critical Review Series, TID-25075 National Technical Information. Service, Springfield.

BRIGGS, G. (1984), *Plume rise and buoyancy effects*. Atmospheric Science and Power Production, D. Randerson, Ed., U.S. Dept. of Energy, DOE/TIC-27601, pp. 327-366

BRIGGS, G. A. (1975), *Plume rise predictions*, Lectures on air pollution and environmental impacts analyses, American Meteorological Society, pp 59-111.

CARHART, R. A., POLICASTRO, A. J. (1991), *A second-generation model for cooling tower plume rise and dispersion – I. Single sources*, Atmospheric Environment. Part A. General Topics, Vol. 25, N. ° 8, pp. 1559-1576.

CARHART, R., POLICASTRO, A., ZIEMER, S. (1982), *Evaluation of mathematical models for natural-draft cooling-tower plume dispersion*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 16, N. ° 1, pp. 67-83.

CARHART, R., POLICASTRO, A., DUNN, W. (1992), *An improved method for predicting seasonal and annual shadowing from cooling tower plumes*, Atmospheric Environment. Part A. General Topics, Vol. 26, N. ° 15, pp. 2845-2852.

CHEREMISINOFF, N. P., CHEREMISINOFF, P. N. (1983), *Cooling Towers: Selection, Design and Practice*, Ann Arbor, Ann Arbor Science Publishers, Inc.

COLBERT, L., JENDRESKY, L., GARCIA, R. (2004), *Investigation of a Cluster of Legionella Infections of Unknown Origin in a Brooklyn Community*, American Journal of Infection Control, Vol. 32, N. ° 3, pp. E74-E75.

CONTINI, D. ROBINS, A. (2004), *Experiments on the rise and mixing in neutral crossflow of plumes from two identical sources for different wind directions*, Atmospheric Environment, Vol. 38, N. ° 22, pp. 3573-3583.

CONTINI, D. ROBINS, A. (2001), *Water tank measurements of buoyant plume rise and structure in neutral crossflows*, Atmospheric Environment, Vol. 35, N.° 35, pp. 6105-6115.

CONTINI, D., HAYDEN, P., ROBINS, A. (2006), *Concentration field and turbulent fluxes during the mixing of two buoyant plumes*, Atmospheric Environment, Vol. 40, N.° 40, pp. 7842-7857.

DON, R. (2002), *Wallula Power Project – Draft Environmental Impact Statement*, Energy Facility Site Evaluation Council.

EPA – Environmental Protection Agency (1985), *Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation)*, US EPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, EPA-45014-80-023R.

HAMAN, K., MALINOWSKI, S. (1989), *Observations of cooling tower and stack plumes and their comparison with plume model "ALINA"*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 23, N.° 6, pp. 1223-1234.

HAMZA, R., GOLAY, M. (1986), *Modelling of moist plumes in turbulent, stratified atmospheres*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 20, N. ° 1, pp. 9-19.

HANNA, S. (1972), *Rise and Condensation of Large Cooling Tower Plumes*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 11, N.° 5, pp. 793-799.

HANNA, S. (1976), *Predicted and observed cooling tower plume rise and visible plume length at the John E. Amos power plant*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 10, N. ° 12, pp. 1043-1052.

HOSKER, R. P., AND S. E. LINDBERG, (1982) – *Review: Atmospheric Deposition and Plant Assimilation of Gases and Particles*. Atmospheric Environment, N. ° 16, pp. 889-910.

ISRAEL, G., OVERCAMP, T., PRINGLE, W. (1977), *A method to measure drift deposition from saline natural draft cooling towers*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 11, N.° 2, pp. 123-130.

JANICKE, U., JANICKE, L. (2001), *A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes*, Atmospheric Environment, Vol. 35, N.° 5, pp. 877-890.

KAYIN S., TUNCEL G., YURTERI C. (1999), *Local Air Quality Impacts due to Downwash Around Thermal Power Plants: Numerical Simulations of the Effect of Building Orientation*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 58, N.° 1, pp. 61-77(17).

HURLEY, P., BLOCKLEY, A., RAYNER, K. (2001), *Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia*, Atmospheric Environment, Vol. 35, N.° 10, pp. 1871-1880.

KESSLER, E. (1969), *On the distribution and continuity of water substance in atmosphere circulations*. Met. Monog., Vol. 10, Am. Meteo. Soc.

KIRRAGE, D., REYNOLDS, G., SMITH, G., OLOWOKURE, B. (2007), *Investigation of an outbreak of Legionnaires' disease: Hereford, UK 2003*, Respiratory Medicine, Vol. 101, N. ° 8, pp. 1639-1644.

KHAN, J., QURESHI, B., M. ZUBAIR, S. (2004), *A comprehensive design and performance evaluation study of counter flow wet cooling towers*, International Journal of Refrigeration, Vol. 27, N. ° 8, pp. 914-923.

KOENIG, L. (1981), *Anomalous snowfall caused by Natural-Draft cooling towers*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 15, N.° 7, pp. 1117-1128.

LEE, J. (1977), *Potential weather modification from cooling tower effluents at conceptual power parks*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 11, N. ° 8, pp. 749-759.

MACDONALD, R., STROM, R., SLAWSON, P. (2002), *Water flume study of the enhancement of buoyant rise in pairs of merging plumes*, Atmospheric Environment, Vol. 36, N.° 29, pp 4603-4615.

MATOS, M. A. A. (1998), *Propriedades termofísicas de alguns gases, sólidos e da água*. Ref. R6MMAM/DAOUA. Universidade de Aveiro.

MERONEY, R. (2006), *CFD prediction of cooling tower drift*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 94, Issue 6, Pages 463-490.

MEYER, J., EAGLES, T., KOHLENSTEIN, L., KAGAN, J., STANBRO, W. (1974), *Mechanical Draft Cooling Tower Visible Plume Behavior: Measurements, Models, Predictions*, Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins Univ., presented at Cooling Tower Environment 1974, March 4-6, Univ. of Maryland, PPM-7.

MICHIOKA, T., SATO, A., KANZAKI, T., SADA, K. (2007), *Wind tunnel experiment for predicting a visible plume region from a wet cooling tower*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Available Online.

MOKHTARZADEH-DEGHAN, M., KONIG C., ROBINS, A. (2006), *Numerical study of single and two interacting turbulent plumes in atmospheric cross flow*, Atmospheric Environment, Vol. 40, N. ° 21, pp. 3909-3923.

PALZ, W., GREIF, J. (1996), *European solar radiation atlas: solar radiation on horizontal and inclined surfaces*. Commission of the European Communities, 3rd ed. Berlin: Springer.

PARR, P., TAYLOR, F., BEAUCHAMPT, J. (1976), *Sensitivity of tobacco to chromium from mechanical draft cooling tower drift*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 10, N.º 6, pp. 421-423.

PASTORIS, M., CICERONI, L., LO MONACO, R., GOLDONI, P., MENTORE, B., FLEGO, G., CATTANI, L., CIARROCCHI, S., PINTO, A., VISCA, P. (1997), *Molecular epidemiology of an outbreak of Legionnaires' disease associated with a cooling tower in Genova-Sestri Ponente, Italy*. Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis., Vol. 16, N. ° 12, pp.883-892

POLICASTRO, A. J., DUNN, W. E., CARHART, R. A., COKE, L., WASTAG M., GAVIN, P. BOUGHTON, B. (1984), *User's manual: Cooling tower plume prediction code*. Electric Power Research Institute, Report N° EPRI CS-3403-CCM.

POLICASTRO, A. J., DUNN, W. E., CARHART, R. A., COKE, L. (1987), *User's Manual: Cooling-Tower-Plume Prediction Code (Revision 1)*, Engineering and Environmental Science, Research Project 906-1, p. 2-1 2-26.

POLICASTRO, A. J., DUNN, W. E., CARHART, R. A. (1994), *A model for seasonal and annual cooling tower impacts*. Atmospheric Environment, Vol. 28, N. ° 3, pp. 379-395.

POLICASTRO, A., DUNN, W., GAVIN, P., BOUGHTON, B., ZIEBARTH, J. (1981), *Studies on Mathematical Models for Characterizing Plume and drift Behavior from*

Cooling Towers, vol.3: Mathematical Model for Single-Source(Single-Tower) Cooling Tower Drift Dispersion, CS-1683, Vol. 3, Research Project 906-2, Argonne National Laboratory, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

PRESOTTO, L., BELLASIO, R. BIANCONI, R. (2005), *Assessment of the visibility impact of a plume emitted by a desulphuration plant*, Atmospheric Environment, Vol. 39, N. ° 4, pp. 719-737.

RIBEIRO, C. (2005), *Aplicação de um modelo meteorológico e de qualidade do ar a Portugal*, Dissertação apresentada no âmbito do mestrado de Poluição Atmosférica, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

RYZNAR, E. (1978), *An observation of cooling tower plume effects on total solar radiation*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 12, N. ° 5, pp. 1223-1224.

RANDALL, J., LONG, M., KANSAL, R. (1998), *Cooling tower plume abatement at Chicago's O'Hare Airport*, Cooling Tower Institute Annual Meeting. 14 pp..

SPX Cooling Towers (2006), *Dry Cooling for Power Plants: An Innovative Modularization Concept*, PowerGen Europe SPX Conference, Cologne, May 2006

SANLI-YURUDU, N., KIMIRAN-ERDEM, A., COTUK, A. (2007), *Studies on the efficacy of Chloramine T trihydrate (N-chloro-p-toluene sulfonamide) against planktonic and sessile populations of different Legionella pneumophila strains*, International Journal of Hygiene and Environmental Health, Vol. 210, N. ° 2, 7 March 2007, pp. 147-153.

SCHATZMANN, M, POLICASTRO, A. (1984a), *Plume Rise from Stacks with Scrubbers: A State of the Art Review*, Bulletin American Meteorological Society, Vol. 65, No. 3.

SCHATZMANN, M, POLICASTRO, A.(1984b), *An advanced integral model for cooling tower plume dispersion*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 18, N. ° 4, 1984, Pp. 663-674.

SCHATZMANN, M., LOHMEYER, A., ORTNER, G. (1987), *Flue gas discharge from cooling towers. Wind tunnel investigation of building downwash effects on ground-level concentrations*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 21, N. ° 8, pp. 1713-1724.

SLAWSON, P. (1982), *Some observations on modelling the mechanical-draft cooling tower plume at plant Gaston*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 16, N.º 9, pp. 2089-2094.

SLAWSON, P. (1978), *Observations and predictions of natural draft cooling tower plumes at paradise steam plant*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 12, N.º 8, pp. 1713-1724.

SOULE, H., CHARVIER, A., PESSEY, N., BIENFAIT, R., BRU, J., GAILLAT, M., AND BLAND, S. (2000), *Legionelloses nosocomiales: investigation d'une épidémie de deux cas et mesures de prévention*, Médecine et Maladies Infectieuses, Vol. 30, N. ° 5, pp. 284-290.

THORP, J., ORGILL, M. (1984), *Cooling tower visible plume rise analyses by time integrated photographs*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 18, N.º 4, pp. 675-683.

TÜRETGEN, I., SUNGUR, E., COTUK, A. (2005), *Enumeration of Legionella pneumophila in cooling tower water systems*, Environmental Monitoring and Assessment Vol. 100, pp. 53–58.

TYAGI, S., WANG, S., MA, Z. (2006), *Prediction, potential and control of plume from wet cooling tower of commercial buildings in Hong Kong: A case study*, International Journal of Energy Research, Vol. 31, N. ° 8, pp. 778-795

TALBOT, J. J. (1979), *A review of potential biological impacts of cooling tower salt drift*. Atmospheric Environment, Vol. 13, N. ° 3, pp. 395 – 405.

WANG, S., TYAGI, S., SHARMA, A., KAUSHIK, S. (2007), *Application of solar collectors to control the visible plume from wet cooling towers of a commercial building in Hong Kong: A case study*, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, N.º 8-9, pp. 1394-1404.

WEINSTEIN, A. F. (1970), *A numerical model of cumulus dynamics and microphysics*. J. of Atm. Sc., Vol 27, pp. 246-255.

WIGLEY, T., SLAWSON, P. (1975), *The effect of atmospheric conditions on the length of visible cooling tower plumes*, Atmospheric Environment (1967), Vol. 9, N.º 4, pp. 437-445.

Anexo I – Equações fundamentais dos modelos aplicados

Equações Fundamentais do SIAPTR

(Borrego *et al.*, 1990a)

Equação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial(W^2/2)}{\partial z} = \frac{g}{e_m} \left[\frac{T_p(1+0,61.e_w.Q_p) - T_e(1+0,61.Q_e)}{T_p(1+0,61.e_w.Q_p)} - e_w(Q_c + Q_h) \right] - O_m \frac{W^2}{R_m}$$

Equação da energia

$$\frac{\partial T_p}{\partial z} = \left[\frac{L.e_w}{C_p} \frac{\partial Q_{ps}}{\partial z} \right] - \frac{g}{C_p} - \frac{O}{R} (T_p - T_e) + \left[\frac{L_i.e_w}{C_p} \frac{(Q_h + Q_c)}{z} \right] - \left[\frac{L.e_w}{C_p} . O_w \frac{Q_p - Q_e}{R_w} \right]$$

Equação para a água do tipo nuvem

$$\frac{\partial Q_c}{\partial z} = - \frac{\partial Q_{ps}}{\partial z} - 10^{-3} \frac{Q_c - 0,0005}{W} - 0,00522 \frac{Q_c (TQ_h)^{0,0875}}{W} - \frac{O_w.(Q_p + Q_c - Q_e)}{R_w}$$

Equação para a água do tipo hidrometeórico

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_h}{\partial z} &= 10^{-3} \frac{Q_c - 0,0005}{W} - 0,00522 \frac{Q_c (TQ_h)^{0,0875}}{W} - \frac{4,5.Q_h (TQ_h)^{0,125}}{K} + C - P + H \\ K &= W.R_w \cdot \cos \left[\arctan \left(\frac{W}{U} \right) \right] \\ P &= O_w \cdot \frac{Q_h}{R_w} + \frac{K_2}{z} \\ H &= \frac{K_2}{\partial z} \end{aligned}$$

Equação para o teor de vapor de água

$$C = -0,0000061.(Q_s - Q_e) + \frac{TQ_h^{0,65}}{W}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial z} = -O_w.(Q_p - Q_e) - \frac{C}{R_w}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial z} = \frac{\partial Q_{ps}}{\partial z} - C$$

Equações para o transporte de massa*(Velocidade de vento inferior ou igual a 1 m.s⁻¹)*

$$\frac{\partial R_m}{\partial z} = \frac{\partial R_t}{\partial z} = 0,15 - R_t \frac{g}{T_p} \frac{T_p - T_e}{2.W^2}$$

$$\frac{\partial R_w}{\partial z} = 0,71 \frac{\partial R_t}{\partial z}$$

Equações para o transporte de massa*(Velocidade de vento superior a 1 m.s⁻¹)*

$$\frac{\partial R_t}{\partial z} = 0,4 \frac{R_t}{2U} \frac{\partial U}{\partial z}$$

$$\frac{\partial R_w}{\partial z} = 0,71 \frac{\partial R_t}{\partial z}$$

$$\frac{\partial R_m}{\partial z} = 1,5 \frac{\partial R_t}{\partial z}$$

Notações R_m : raio do penacho “quantidade de movimento” (m) R_t : raio do penacho “temperatura” (m) R_w : raio do penacho “humidade” (m) U : velocidade do vento (m.s⁻¹) W : velocidade do penacho (m.s⁻¹) T_p : Temperatura do penacho (K)

T_e : Temperatura do ar ambiente (K)

O_m : coeficiente de taxa de entrada de ar no penacho “quantidade de movimento”

O_t : coeficiente de taxa de entrada de ar no penacho para o penacho “temperatura”

O_w : coeficiente de taxa de entrada de ar no penacho para o penacho “humidade”

Q_p : razão de mistura do penacho (g.g^{-1})

Q_e : razão de mistura do ar ambiente (g.g^{-1})

Q_c : teor em água do tipo nuvem (g.g^{-1})

Q_h : teor em água do tipo hidrometeórico (g.g^{-1})

E_w : razão entre o fluxo quantidade de movimento efectivo e o fluxo de quantidade de movimento “temperatura”

L : calor latente de solidificação (J.g^{-1})

C_p : calor específico do ar a pressão constante ($\text{J.g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Equações Fundamentais do SACTI

(Carhart e Policastro, 1991)

Equação da conservação do fluxo de massa

$$\frac{d\Phi_m}{ds} = \mu\Phi_m$$
$$\Phi_m = \pi R_m^2 \overline{\rho_p} V$$
$$\mu = \frac{2}{R_t} \frac{\rho_a}{\rho_p} \frac{V_e}{V}$$

Equação da conservação do fluxo de movimento horizontal

$$\frac{d\Phi_{hm}}{ds} = (\mu\Phi_m) V_x; \quad V_x = U$$

Equação da conservação do fluxo de movimento vertical

$$\frac{d\Phi_{vm}}{ds} = \Phi_m \frac{g}{v \cdot V} \left(\frac{T_p^* - T_a^*}{T_a^*} - \lambda \sigma \right)$$

Equação da conservação do fluxo de entalpia

$$\frac{d\Phi_e}{ds} = -C_p \frac{W}{v \cdot V} \Phi_m \gamma_d \frac{\rho_a}{\rho_p} + \frac{\mu}{v} (C_p T_a + \lambda L_v X_a) \Phi_m$$

Equação da conservação do fluxo total de água

$$\frac{d\Phi_{tw}}{ds} = \mu\Phi_m \frac{\lambda}{v} X_a$$

Equação da conservação do fluxo de água líquida

$$\frac{d\Phi_{lw}}{ds} = \frac{Cp\Phi_m}{L_v\nu} \frac{\chi}{1+\chi} \left\{ \left(\gamma_d \frac{\rho_a}{\rho_p} + \frac{\Pi}{\tau} \right) \frac{W}{V} + \mu \left[(T_p - T_a) - \frac{Xp - Xa}{\tau} \right] \right\}$$

$$\Pi = -\rho_a g \left(\frac{\partial Q_s}{\partial p} \right)$$

$$\chi = \frac{\lambda L_v \tau}{C_p}$$

$$\tau = \frac{\partial Q_s}{\partial T}$$

Notações

g : aceleração da gravidade (m.s^{-2})

L_v : calor latente de vaporização da água (J. kg^{-1})

R_m : raio do penacho “quantidade de movimento” (m)

R_t : raio do penacho “temperatura” (m)

R_w : raio do penacho “humidade” (m)

s : distancia percorrida pelo penacho (m)

T_a : temperatura do ar ambiente (K)

T_p : temperatura do penacho (K)

U : velocidade do vento (m.s^{-1})

V_x : Velocidade horizontal do penacho (m.s^{-1})

V : Velocidade do penacho total (m.s^{-1})

V_e : velocidade de entrada de ar no penacho

W : velocidade vertical do penacho (m.s^{-1})

X_a : razão de mistura do ar ambiente (g.g^{-1})

X_p : razão de mistura do penacho (g.g^{-1})

Q_s : razão de mistura de saturação a uma temperatura e pressão

Φ_{lw} : fluxo água líquida

Φ_e : fluxo de entalpia

Φ_{hm} : fluxo de quantidade movimento horizontal

Φ_m : fluxo de massa

Φ_{pw} : fluxo total de água

Φ_{vm} : fluxo de massa

γ : gradiente adiabático seco

λ : razão entre a área de penacho “humidade” com a área do penacho “temperatura”

μ : taxa de entrada de ar no penacho

ν : razão entre a área de penacho “quantidade de movimento” com a área do penacho “temperatura”

ρ_a : massa volúmica do ar (kg.m^{-3})

$\overline{\rho_p}$: média da massa volúmica do penacho através do penacho “quantidade de movimento”

C_p : calor específico do ar a pressão constante ($\text{J.g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

σ : razão de mistura da água líquida (g.g^{-1})

ANEXO II – Formato dos ficheiros meteorológicos no SIAPTR

- Azimute 1, Azimute 2 (2 reais)
- Altura angular 1, altura angular 2 (2 reais)
- Distância à fonte 1, Distância à fonte 2 (2 reais)
- Temperatura de saída (°C), velocidade de saída de penacho (m.s^{-1}), direcção de vento (graus), pressão atmosférica à altura das torres (mb) (4 reais)
- Data, formato dd/mm/aaaa
- Hora, hh:mm
- Níveis da radiossondagem:
 - Altura (m), Temperatura ambiente (°C), Velocidade vento (m.s^{-1}), Humidade relativa [0-1] ou Temperatura orvalho (°C) (4 reais)

ANEXO III – Informação de saída do SACTI

Resultados do PREPROCESSOR

PREP.OUT

- Apresentação do cálculo dos vários parâmetros para cada registo horário (opcional)
- Tabelas de frequência por frequência de direcção de vento:
 - Velocidade de vento;
 - Humidade relativa;
 - Ponto de orvalho;
 - Temperatura seca;
 - Classes de estabilidade;
 - Tabela K (UA/VE) – razão de velocidade transversal;
 - Vstar – volume de diluição;
 - Gama de parâmetros de comprimento e altura de pluma;
- Apresentação das categorias elaboradas, tendo como parâmetros
 - UH – velocidade do vento à altura da chaminé
 - WX – expoente usado no cálculo do perfil de vento
 - DBT – temperatura de bolbo seco
 - DTDZ – gradiente vertical de temperatura
 - VE – Velocidade de saída
 - TE – temperatura de saída
 - MXHT – altura de camada de mistura
 - PLGT – parâmetro de comprimento de pluma.

Resultados do subprograma MULT

MULT.OUT

- Coeficientes de α e β para a entrada de ar
 - Zona de esteira e o factor de pressão
 - Coeficientes de Briggs escolhidos
 - Temperatura de formação de gelo
 - Tolerância para a integração numérica
 - Opções definidas pelo utilizador
-
- Tabela de distribuição das gotas que abandonam a pluma
 - Diâmetro da gota
 - Distância a que a gota deixa a pluma
 - Altura a que gota deixa a pluma
 - Velocidade de sedimentação da gota
 - Número da gota considerada
-
- Tabela da distribuição de gotas resultantes da primagem
 - Diâmetro da gota
 - Distância a que a gota deixa a pluma
 - Altura a que gota deixa a pluma
 - Distância a que ocorre a sedimentação
 - Diâmetro final da gota
 - Massa final da gota
 - Velocidade final da gota
 - Número de gotas emitidas
 - Caudal mássico se gotas emitidas

Resultados do subprograma TABLES

TABLES.OUT

- Apresenta por categoria:
 - O comprimento da pluma

- A altura de pluma
- O raio da pluma
- Apresenta por direcção de vento a frequência de:
 - Categoria de pluma
 - Classes de estabilidade
 - Gama de velocidade do vento para altura de referência
 - Baixa: $0 - 3 \text{ m.s}^{-1}$
 - Média: $3 - 7 \text{ m.s}^{-1}$
 - Alta: $> 7 \text{ m.s}^{-1}$
 - Os resultados de velocidade de vento e estabilidade combinado
 - Comprimento de pluma
 - Altura de pluma
 - Raio de pluma
 - Horas de sombra causada pela presença do penacho
 - Perda total de energia solar
 - Perda de energia
 - Perda de radiação solar directa
 - Quantificação da deposição salina para cada distância
 - Quantificação da massa de água depositada para cada distância
 - Horas de formação de nevoeiro/gelo prevista.

ANEXO IV – Estrutura do SACTI

INPUT	SUBPROGRAMA	OUTPUT
-------	-------------	--------

PREP.USR		FORT.2
	1. PREPROCESSOR	FORT.3
CD144.TAP		FORT.4
MIXHT.TAP		PREP.OUT

MULT.USR		FORT.8
	2. MULT	
FORT.3		MULT.OUT

TABLES.USR		FORT.9
FORT.2	3. TABLES	
FORT.4		TABLES.OUT
FORT.8		

PAGE.USR		
	4. PAGEPLOT	PAGE.OUT
FORT.9		

ANEXO V – Elaboração de ficheiros meteorológicos no SACTI

Para a elaboração de um ficheiro meteorológico segundo o formato CD144 é necessário dispor de dados:

1. Ano
2. Mês
3. Dia
4. Hora
5. Altura de tecto de nuvens [centenas de pés]
6. Ponto de orvalho [°F]
7. Direcção do vento [direcção/10]
8. Velocidade do vento [nós]
9. Temperatura de bolbo seco [°F]
10. Temperatura de bolbo húmido [°F]
11. Humidade relativa [%]
12. Cobertura nebulosa/nebulosidade [0-9]

Foram desenvolvidas folhas de cálculo para a determinação dos parâmetros 5, 6, 7, 8, 9, 10. Foi igualmente elaborado uma folha de cálculo de forma a fazer a passagem de dados de cobertura nebulosa de uma resolução hexa-horária, para uma resolução horária.

Após obtenção de todos os parâmetros anteriormente referidos, procede-se à compilação de todos os dados numa folha de cálculo.

O passo seguinte corresponde à eliminação dos registos que não apresentem medições de:

- Ponto de orvalho;
- Direcção de vento;
- Velocidade do vento;
- Temperatura seca;
- Temperatura húmida;

- Humidade relativa;

Segue-se a definição do número de caracteres a atribuir por cada medição, sendo que a formatação obrigatória é apresentada abaixo:

- Ano – 2 caracteres;
- Mês – 2 caracteres;
- Dia – 2 caracteres;
- Hora – 2 caracteres;
- Altura de tecto de nuvens – 3 caracteres;
- Ponto de orvalho – 3 caracteres;
- Direcção de vento – 2 caracteres;
- Velocidade de vento – 2 caracteres;
- Temperatura seca – 3 caracteres;
- Temperatura Húmida – 3 caracteres;
- Humidade relativa – 3 caracteres;
- Cobertura nebulosa – 1 caracter.

No final destas operações, devem ser removidos todos os cabeçalhos e o ficheiro deve ser guardado com a extensão *.txt, devendo possuir um aspecto semelhante ao apresentado na Figura 47.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	99	01	01	00	010	055	18	12	059	058	086	9
2	99	01	01	01	010	055	17	11	059	057	087	-
3	99	01	01	02	009	055	17	13	059	058	088	-
4	99	01	01	03	009	055	18	14	059	058	088	-
5	99	01	01	04	008	055	18	14	059	058	089	-
6	99	01	01	05	008	055	17	14	059	058	090	-
7	99	01	01	06	007	056	17	15	059	058	090	9
8	99	01	01	07	007	056	18	16	059	059	090	-
9	99	01	01	08	008	056	18	16	059	059	090	-
10	99	01	01	09	007	056	18	16	059	059	091	-
11	99	01	01	10	007	057	18	15	060	059	090	-
12	99	01	01	11	007	057	19	17	060	060	091	-
13	99	01	01	12	008	058	19	18	061	061	089	9
14	99	01	01	13	007	058	19	20	061	061	090	-
15	99	01	01	14	010	057	20	18	061	060	087	-
16	99	01	01	15	009	057	19	19	061	060	088	-
17	99	01	01	16	009	057	19	17	061	060	088	-
18	99	01	01	17	009	057	19	17	061	060	088	-
19	99	01	01	18	008	057	19	20	060	059	089	9
20	99	01	01	19	006	057	19	19	060	060	091	-
21	99	01	01	20	007	057	19	19	060	060	090	-
22	99	01	01	21	007	057	19	16	060	059	091	-
23	99	01	01	22	006	057	19	16	059	059	092	-
24	99	01	01	23	006	058	19	18	060	060	091	-
25	99	01	02	00	007	058	19	20	061	061	091	9
26	99	01	02	01	007	058	19	19	061	061	091	-
27	99	01	02	02	007	058	19	19	060	060	091	-
28	99	01	02	03	006	058	21	17	060	060	092	-

Figura 47. Representação do aspecto final dos dados meteorológicos, para constituição de um ficheiro meteorológico com o formato CD144.

Para finalizar este procedimento é necessário executar o programa responsável pela elaboração de ficheiros com formato CD144 – “escrevecd144.exe”.

Para tal é solicitado por esse programa (Figura 48) o nome do ficheiro proveniente da folha de cálculo, o nome de ficheiro de saída e o número de linhas de linhas a serem lidas.



Figura 48. Aspecto do programa responsável pela escrita de ficheiros no formato CD144.

Recomenda-se como nome do ficheiro de saída “CD144.tap”.

ANEXO VI – Elaboração de ficheiros de altura de camada de mistura

Para a elaboração dos ficheiros bi-diários de altura de camada de mistura, deve-se elaborar um ficheiro com 365 registos, para um ano comum e 366 para um ano bissexto, segundo um formato TD9689.

O valor correspondente à altura de camada de mistura matinal deve estar compreendido entre as 02:00 e as 06:00 horas, ao passo que o valor correspondente à parte da tarde deve ser escolhido com base num período de tempo entre as 12:00 e 16:00.

Para a elaboração de um ficheiro com este formato, recorreu-se à construção de uma folha de cálculo. Nesta devem estar presentes 365 registos (salvo caso se trate de um ano bissexto, com 366), devendo existir os seguintes dados e com a seguinte formatação:

- Ano – 2 caracteres;
- Mês – 2 caracteres;
- Dia – 2 caracteres;
- Altura de camada de mistura matinal – 4 caracteres;
- Altura de camada de mistura à tarde – 4 caracteres.

No final devem ser eliminados todos os cabeçalhos, de modo a que o ficheiro fique com um formato idêntico ao representado na Figura 49.

	A	B	C	D	E
1	99	01	01	0561	0406
2	99	01	02	0280	0175
3	99	01	03	0289	0028
4	99	01	04	0488	0293
5	99	01	05	0488	1002
6	99	01	06	1463	0091
7	99	01	07	0215	1026
8	99	01	08	0390	0189
9	99	01	09	0488	1260
10	99	01	10	0272	0732
11	99	01	11	0146	0719
12	99	01	12	0195	0732
13	99	01	13	0195	0488
14	99	01	14	0236	0390
15	99	01	15	0244	0488
16	99	01	16	0075	0488

Figura 49. Representação do aspecto final dos dados meteorológicos, para constituição de um ficheiro de altura de camada de mistura bi-diário com um formato TD9689.

De seguida o ficheiro deve ser guardado com a extensão *.txt.

Para finalizar este procedimento é necessário executar o programa responsável pela elaboração de ficheiros com formato TD9689 – “altura_mistura.exe”.

Para tal é solicitado por esse programa (Figura 50) o nome do ficheiro proveniente da folha de cálculo, o nome de ficheiro de saída e o número de linhas a serem lidas.

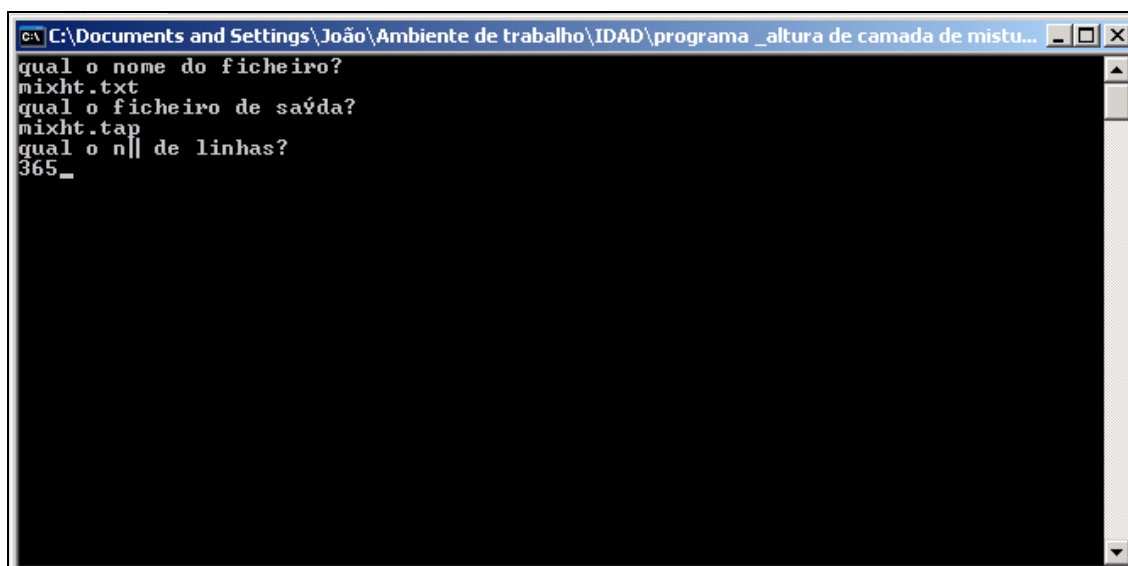


Figura 50. Aspecto do programa responsável pela escrita de ficheiros no formato TD9689.

Recomenda-se como nome do ficheiro de saída “MIXHT.tap”.

ANEXO VII – Caudal de ar de entrada e potência dissipada por torres de refrigeração

Central do Carregado

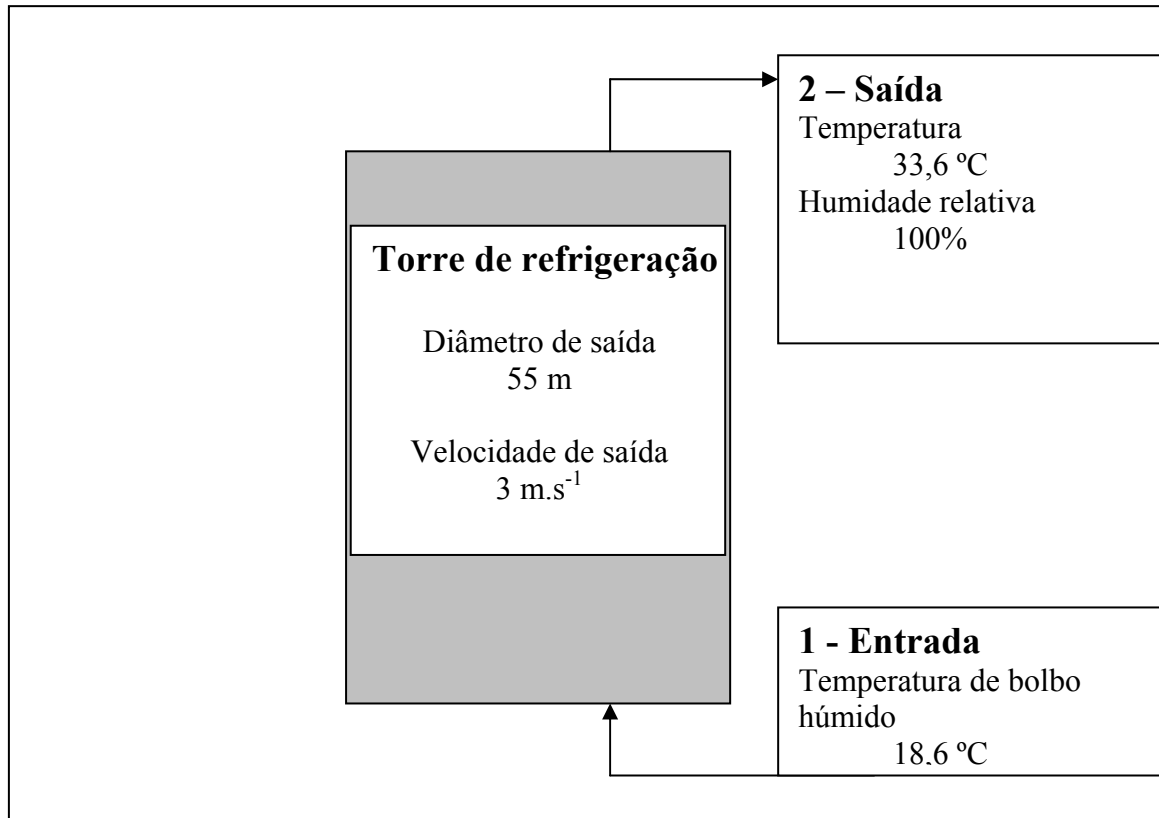


Figura 51. Esquema considerado para a realização do balanço mássico e energético da torre.

Cálculo do caudal mássico do ar de entrada

- Cálculo do caudal volúmico de saída

$$Q = r_{\text{torre}} \times \text{velocidade_saída} = 7123 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Considerando o percentil 95 da temperatura de bolbo húmido da estação de Verão, tem-se que:

Temperatura de saída (T_{out}) = 33,6 °C

Calculando a pressão de saturação do vapor de água (P_s), através das fórmulas de Matos – relatório técnico, 1998

Tem-se que $P_s = 0,052$ bar

- Desta forma, a razão de mistura de saturação (r_s) será

$$r_s = 0,622 \frac{P_s}{P_{atm} - P_s} = 0,622 \frac{0,042}{1,024 - 0,042}$$

$$r_s = 0,033 \text{ Kg H}_2\text{O} \cdot (\text{Kg ar seco})^{-1}$$

Como o efluente à saída da torre de refrigeração é considerado saturado, então a sua razão de mistura é igual à razão de mistura de saturação.

Considerando que o efluente só apresenta vapor de água e ar seco, tem-se que:

- Cálculo das fracções mássicas

$$w_{H_2O} = \frac{r_s}{1 + r_s} = \frac{0,033}{1 + 0,033} = 0,032 \text{ Kg H}_2\text{O} \cdot (\text{Kg de mistura})^{-1}$$

$$w_{ar_seco} = 1 - 0,033 = 0,968 \text{ Kg ar seco} \cdot (\text{Kg de mistura})^{-1}$$

- Cálculo da razão molar do vapor de água

Sabendo que a massa molar de vapor de água é $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ e do ar seco de $28,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, tem-se que:

$$Y_{H_2O} = \frac{\frac{0,032}{18}}{\frac{0,968}{28,9}} = 0,053 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot (\text{mol de ar seco})^{-1}$$

- Cálculo da fracção molar

$$y_{H_2O} = \frac{0,053}{1 + 0,053} = 0,050 \text{ mol de H}_2\text{O} \cdot (\text{mol de mistura})^{-1}$$

$$y_{ar_seco} = 1 - 0,050 = 0,950 \text{ mol de ar seco} \cdot (\text{mol de mistura})^{-1}$$

- Calculando o caudal mássico de efluente, tem-se que:

$$PQ_{\text{efluente}} = n_{\text{efluente}} RT$$

$$PQ_{\text{efluente}} = \frac{m_{\text{efluente}}}{M} RT$$

$$m_{\text{efluente}} = \frac{Patm \cdot Q_{\text{efluente}} \cdot (y_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + y_{ar_seco} \cdot M_{ar_seco})}{R \cdot T}$$

$$m_{\text{efluente}} = 8202 \text{ Kg (mistura)} \cdot s^{-1}$$

- Cálculo da massa de ar seco

Sabendo que

$$m_{\text{efluente}} = m_{ar_seco} + r_s \cdot m_{ar_seco}$$

$$m_{ar_seco} = \frac{m_{\text{efluente}}}{1 + r_s}$$

$$m_{ar_seco} = \frac{8202}{1 + 0,032}$$

$$m_{ar_seco} = 7940 \text{ Kg ar seco} \cdot s^{-1}$$

Cálculo da massa de água vaporizada.

Temperatura de bolbo húmido – 18.6 °C (HR=100%)

Teremos que $P_s=0,021$ bar,

O que implica que $r_s = 0,013 \text{ Kg H}_2\text{O} \cdot (\text{Kg ar seco})^{-1}$

Como

$$HR = 100 \frac{r}{r_s}$$

$$r = \frac{HR \cdot r_s}{100}$$

$$r = 0,0132 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg ar seco}$$

Então a massa de água que entra com o ar de refrigeração é

$$m_{H_2O} = 7940 \times 0,0132 = 104,8 \text{ Kg H}_2\text{O} \cdot \text{s}^{-1}$$

Então a massa de vapor de água que passa da refrigeração para a corrente de ar é de

$$m_{H_2O \text{ transferida}} = m_{H_2O \text{ sai}} - m_{H_2O \text{ entra}}$$

$$m_{H_2O \text{ sai}} = r_s \cdot m_{\text{ar_seco}} = 0,0132 \times 7940 = 104,8 \text{ Kg H}_2\text{O} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_{H_2O \text{ transferida}} = 158,1 \text{ Kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Assim o caudal de ar de entrada será de $105+7940=8045 \text{ Kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Cálculo da potência dissipada

Considerando o sistema em torno da torre como adiabático, teremos que

Calor do ar de entrada + calor da água de refrigeração da caldeira = calor de ar de saída + calor de água que foi refrigerada.

Contudo, para o cálculo da potência dissipada, sabendo que o ar à saída se encontra saturado e que sofre um aumento de temperatura que ronda os 15 °C, não é necessário conhecer a temperatura da água de refrigeração da caldeira.

Desta forma,

A potência dissipada pela torre de refrigeração será igual a:

Calor total do ar à saída da torre – Calor total do ar à entrada da torre

Calor do ar de entrada do vapor de água

$\Delta H_{reag} = \text{Calor sensível do ar } (H_{ar}) + \text{calor latente do vapor de água existente no ar } (L_{ar})$

- Calor sensível do ar (H_{ar})

$$H_{ar} = m_{ar\text{seco}} \cdot cp_{ar\text{seco}} \cdot (T_{ar} - T_{ref}) + m_{H_2O\text{entra}} \cdot cp_{H_2O} \cdot (T_{ar} - T_{ref})$$

$$H_{ar} = 7940 \times 1 \times (18,6 - 0) + 158 \times 1,84 \times (18,6 - 0)$$

$$H_{ar} = 150864 \text{ KJ.s}^{-1}$$

- Calor latente do vapor de água no ar de entrada

$$L_{ar} = m_{H_2O\text{entra}} \cdot h_{wv}$$

$$L_{ar} = 158 \times 2462$$

$$L_{ar} = 258778 \text{ KJ.s}^{-1}$$

Efluente

H_{prod} = Calor sensível do efluente (H_{eflu}) + calor latente do vapor de água no efluente (L_{eflu})

- Calor sensível

$$H_{eflu} = m_{ar\ sec\ o} \cdot cp_{ar\ sec\ o} \cdot (T_{eflu} - T_{ref}) + m_{H_2O\ sai} \cdot cp_{H_2O} \cdot (T_{eflu} - T_{ref})$$

$$H_{eflu} = 7940 \times 1 \times (33,6 - 0) + 263 \times 1,84 \times (33,6 - 0)$$

$$H_{eflu} = 282617 \text{ KJ.s}^{-1}$$

- Calor latente do vapor de água no efluente

$$L_{eflu} = m_{H_2O\ sai} \cdot h_{wv}$$

$$L_{eflu} = 263 \times 2429$$

$$L_{eflu} = 638827 \text{ KJ.s}^{-1}$$

Deste modo a potência dissipada pela torre de refrigeração

$$\Delta H = (282617 + 638827) - (150864 + 258778)$$

$$\Delta H = 511802 \text{ KJ.s}^{-1}$$

Esta quantidade representa a quantidade de calor dissipado pela torre de refrigeração por unidade de tempo, sendo portanto a potência dissipada.

Deste modo,

$$P_{dissipada} = \underline{512} \text{ MW}$$

ANEXO VIII – Radiossondagens realizadas no Carregado

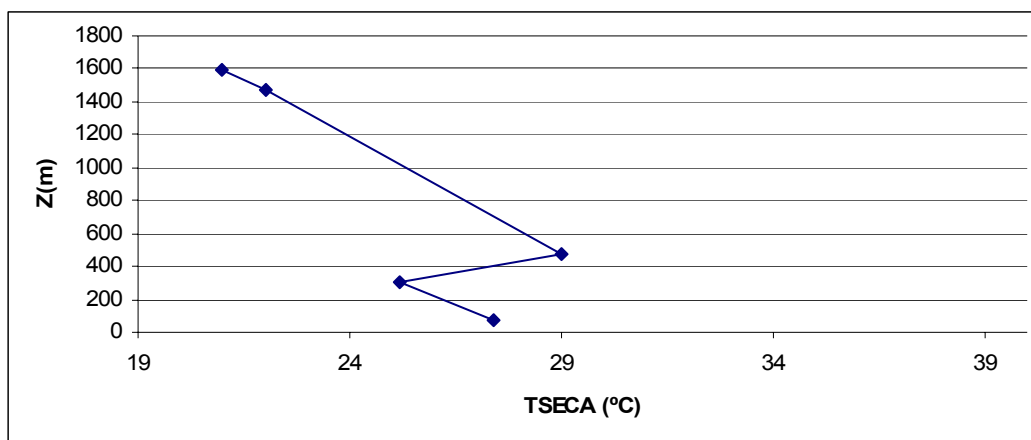


Figura 52. Perfil vertical de temperatura para a situação de Verão.

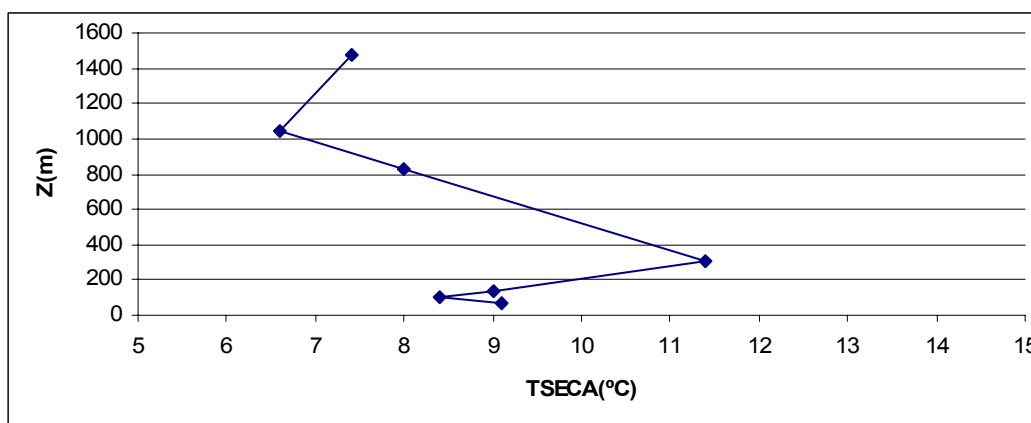


Figura 53. Perfil vertical de temperatura para a situação de Inverno.

ANEXO IX – Subprograma de representação gráfica dos resultados do SACTI

A representação dos resultados obtidos com o modelo SACTI pode ser feita utilizando um software de representação gráfica. Para tal, recorreu-se ao programa SURFER. Neste âmbito, elaborou-se um programa – *conversor_sacti_surfer.exe* – que conseguisse transformar o ficheiro do SACTI “fort.9” com a informação respeitante às várias variáveis, para vários ficheiros capazes de serem lidos pelo SURFER.

A representação esquemática do funcionamento do programa de *conversor_sacti_surfer.exe* é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11. Apresentação do fluxo do programa *conversor_sacti_surfer.exe*

Ficheiro de entrada	Programa	Ficheiros de saída
fort.9	Conversor_sacti_surfer	Comprimento?.dat
		Altura?.dat
		Sombra?.dat
		Loss_ener_t_MJ?.dat
		Loss_ener_fr_%?.dat
		Loss_beam_fr_%?.dat
		Depo_sal?.dat
		Depo_agua?.dat
		Nevoeiro?.dat
		Gelo?.dat

Cada um dos ficheiros apresenta um conjunto de dados específicos, sendo que:

- Comprimento?.dat – Distribuição do comprimento de penacho;
- Altura?.dat – Distribuição da altura de penacho;
- Sombra?.dat – Distribuição das horas de sombra causada pela presença do penacho;
- Loss_ener_t_MJ?.dat – Distribuição da perda total de energia solar em MJ.m-2;
- Loss_ener_fr_%?.dat – Distribuição da perda de energia em percentagem;

- Loss_beam_fr_%?.dat – Distribuição da perda de radiação solar incidente em percentagem;
- Depo_sal?.dat – Distribuição da quantidade de deposição salina para em $\text{Kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$;
- Depo_agua?.dat Distribuição da quantidade da massa de água depositada em $\text{Kg.km}^{-2}.\text{mês}^{-1}$;
- Nevoeiro?.dat – Distribuição das horas previstas de formação de nevoeiro;
- Gelo?.dat – Distribuição das horas previstas de formação de gelo.

O símbolo ? representa o número associado a cada ficheiro, correspondente ao período de tempo em análise. Por exemplo, as informações respeitantes à distribuição do comprimento dos penachos para o período de tempo 1 e período de tempo 2 estão distribuídas por 2 ficheiros, “comprimento1.dat” e “comprimento2.dat”, respectivamente.

ANEXO X – Concentrações nefastas de sais para a vegetação

Os efeitos da deposição salina no ambiente incluem a destruição da vegetação e uma aceleração da corrosão dos materiais abrangidos por este fenómeno.

As lesões verificadas na vegetação podem abarcar efeitos como a descoloração dos tecidos, crescimento reduzido e deformações (Talbot, 1979), para além de uma maior susceptibilidade de ocorrência de doenças e danos provocados por insectos (Hosker and Lindberg, 1982).

A severidade do dano causado pela deposição salina, é ainda dependente das condições meteorológicas, sendo mais nefasta em climas secos e quentes (Talbot, 1979).

Na tabela seguinte estão apresentadas as quantidades de deposição salina, que se reconhecem ter um efeito prejudicial na vegetação (Talbot, 1979).

Tabela 12. Estimativa da quantidade de deposição salina capaz de causar danos na vegetação (Talbot, 1979)

Espécie	Deposição crítica (kg.km⁻².mês⁻¹)
Espécie de cultivo e ornamentação	
<i>Zea mays</i> (Milho)	728
<i>Lycopersicum esculentum</i> (Tomate)	400
<i>Glycine hispida var York</i> (Soja)	2912
<i>Gossypium hirsutum</i> (Algodão)	3200
<i>Medicago sativa</i> (Luzerna)	6280
<i>Phaseolus vulgaris</i>	101120

(Feijoeiro)	
<i>Albizzia julibrissin rósea</i> (Albícia-de-constantinopla)	151680
Espécies florestais	
<i>Tsuga canadensis</i> (Abeto-do-Canadá)	3760
<i>Pinus strobus</i> (Pinheiro - de - Weymouth)	75840
<i>Quercus prinus</i> (Carvalho)	151680
<i>Robinia pseudoacacia</i> (Acácia-bastarda)	151680
<i>Acer rubrum</i> (Plátano)	189600

ANEXO XI – Radiossondagens realizadas na central de Compostilla II

Tabela 13. Número de ordem de cada registo

Nº Caso	Data do registo
1	17/11/1987 17:09
2	17/11/1987 17:15
3	17/11/1987 17:20
4	17/11/1987 17:26
5	17/11/1987 17:30
6	17/11/1987 17:37
7	17/11/1987 17:48
8	17/11/1987 17:50
9	17/11/1987 17:58
10	18/11/1987 16:07
11	19/11/1987 16:20
12	19/11/1987 16:27
13	19/11/1987 16:33
14	20/11/1987 12:51
15	20/11/1987 12:58
16	20/11/1987 13:05
17	20/11/1987 13:12
18	20/11/1987 13:23
19	20/11/1987 13:31
20	20/11/1987 17:31
21	20/11/1987 17:39
22	20/11/1987 17:49
23	20/11/1987 17:59
24	20/11/1987 18:09
25	20/11/1987 18:19

Radiossondagem 1

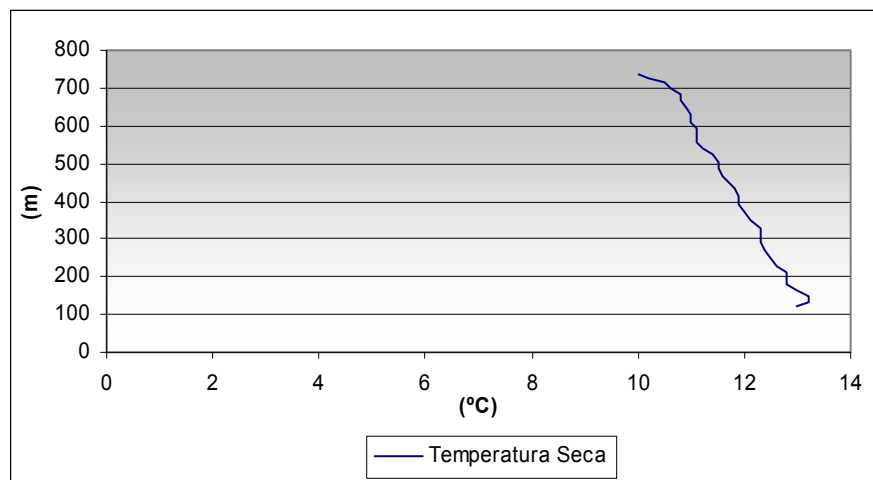


Figura 54. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:09.

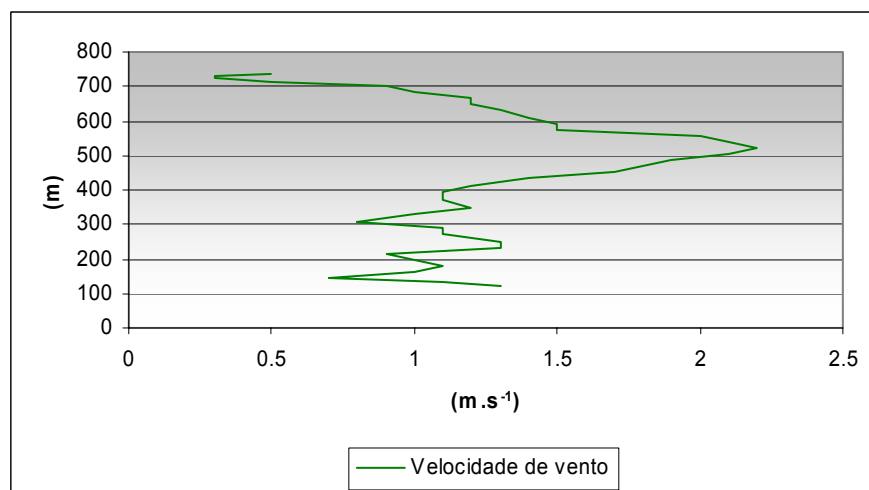


Figura 55. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:09.

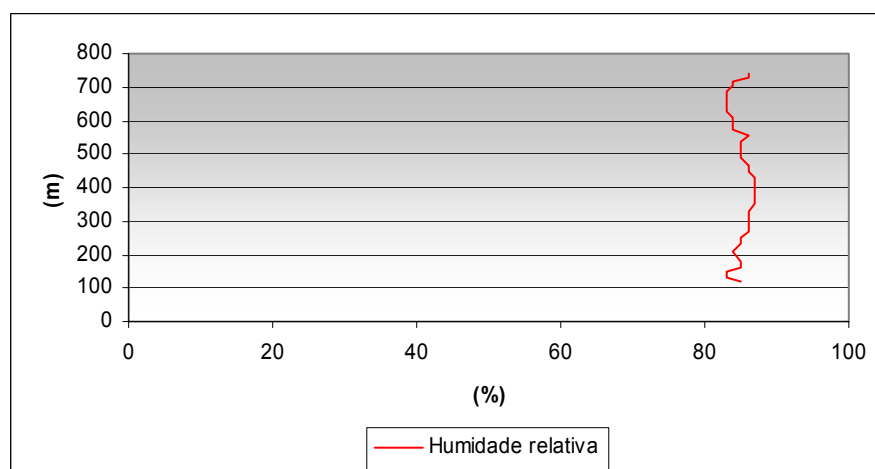


Figura 56. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:09.

Radiossondagem 2

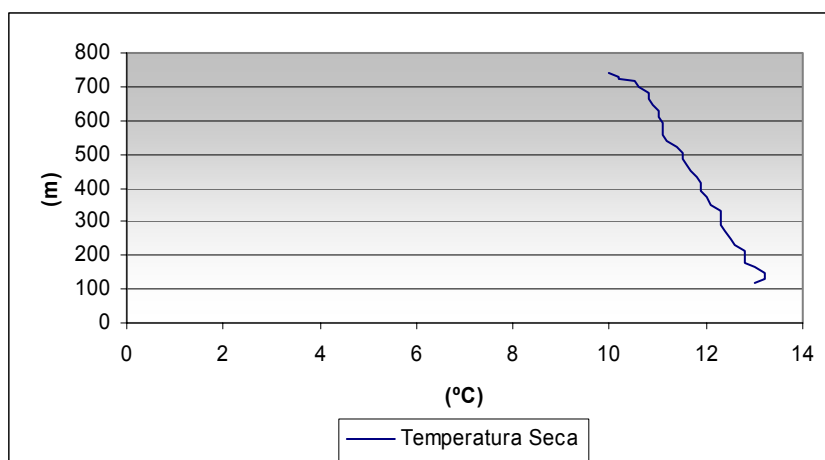


Figura 57. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:15.

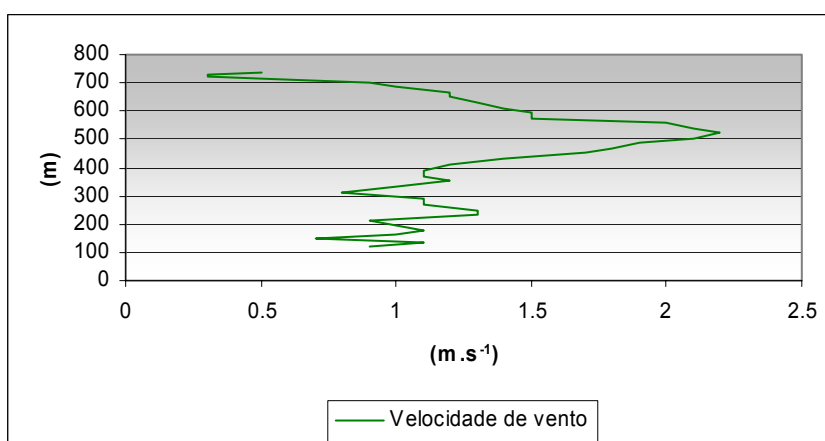


Figura 58. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:15.

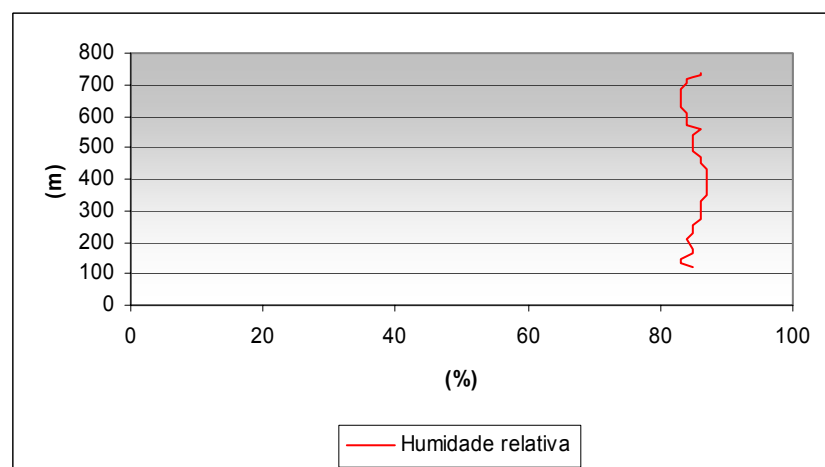


Figura 59. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:15.

Radiossondagem 3

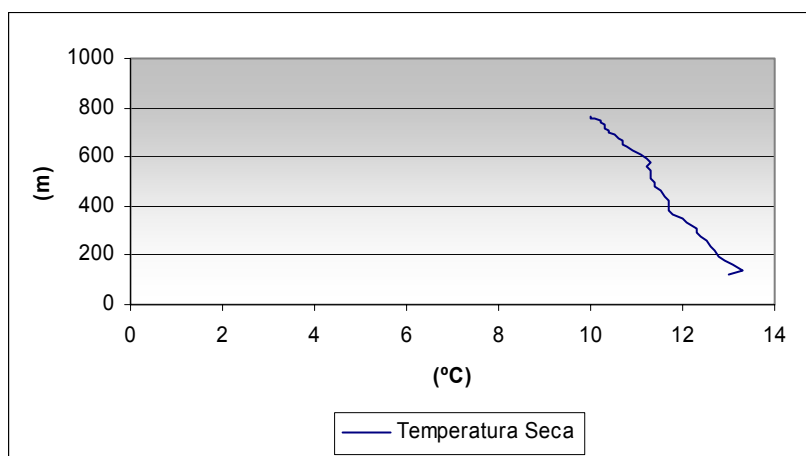


Figura 60. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:20.

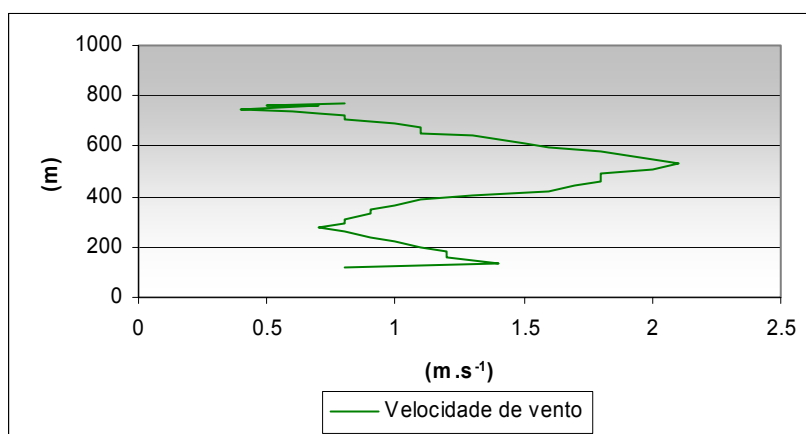


Figura 61. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:20.

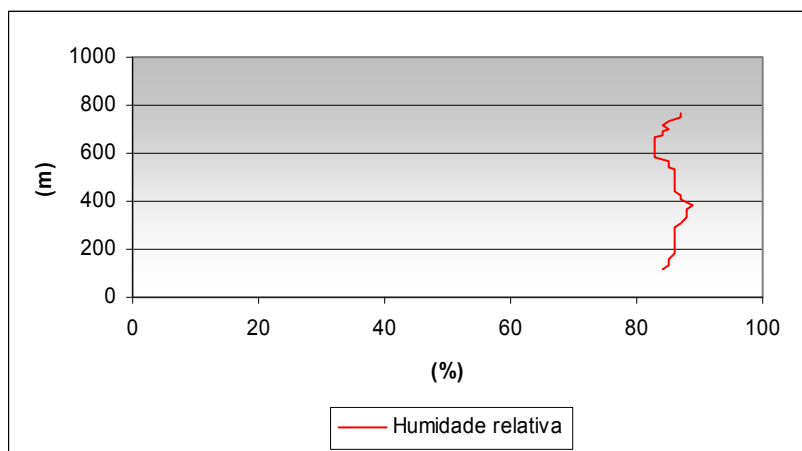


Figura 62. Perfil vertical de umidade relativa medido em 17/11/1987 17:20.

Radiossondagem 4

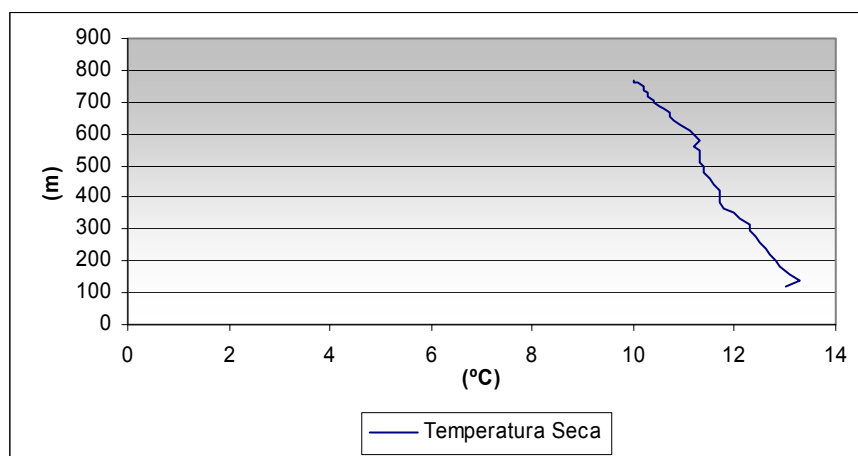


Figura 63. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:26.

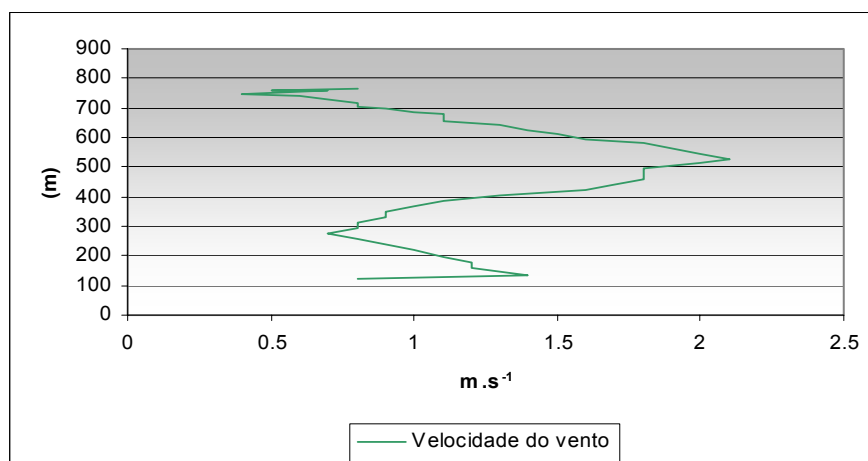


Figura 64. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:26.

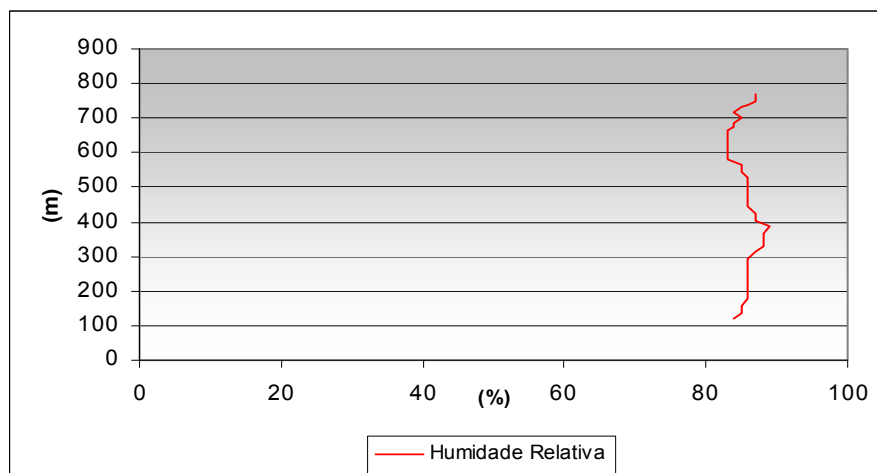


Figura 65. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:26.

Radiossondagem 5

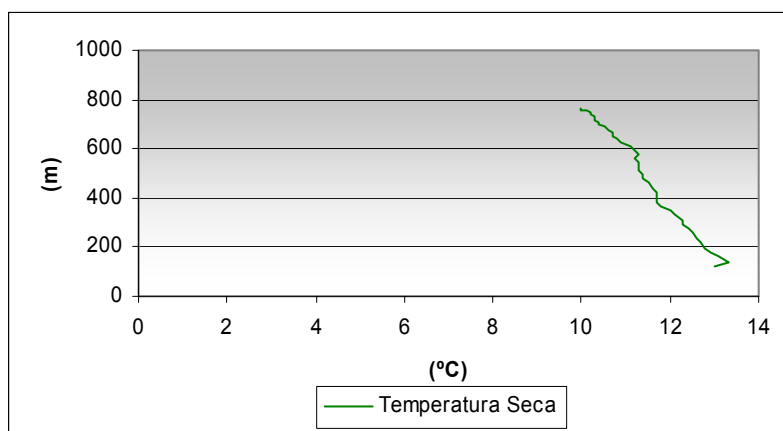


Figura 66. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:30.

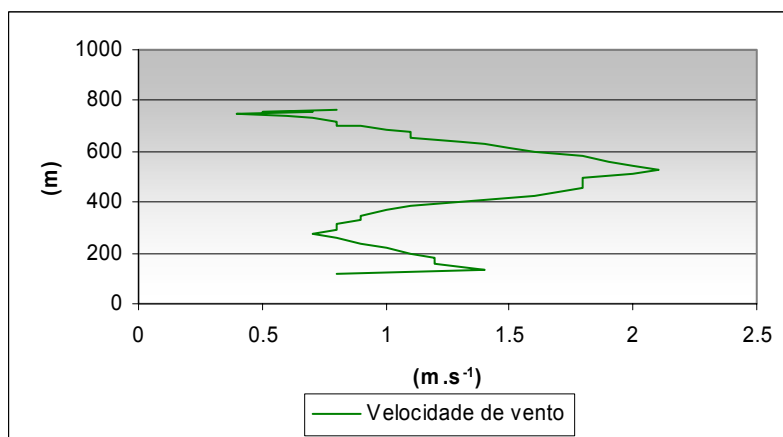


Figura 67. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:30.

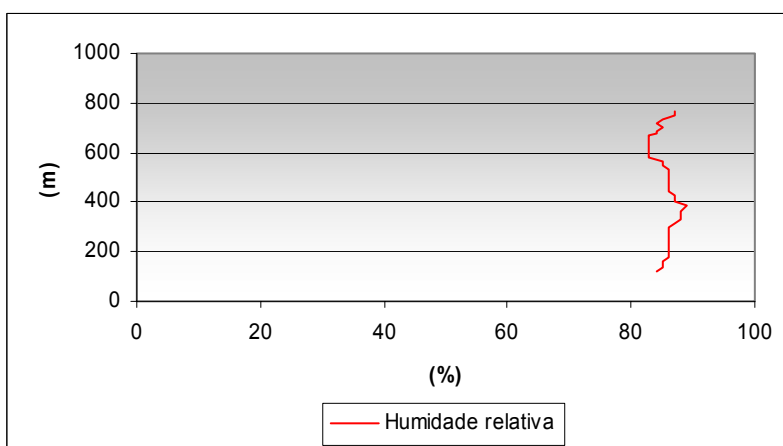


Figura 68. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:30.

Radiossondagem 6

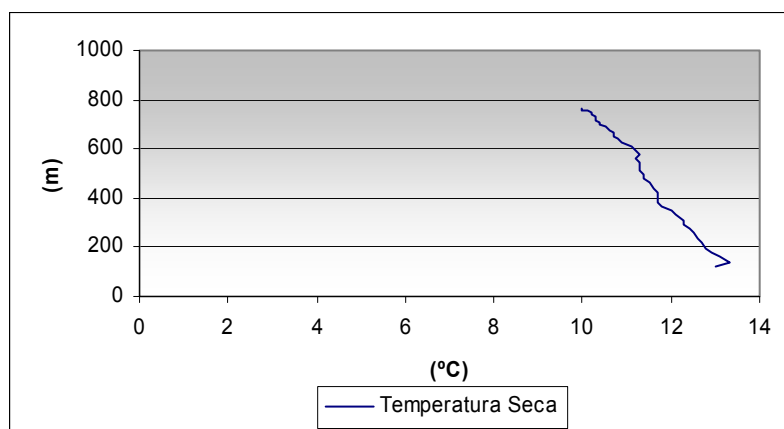


Figura 69. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:37.

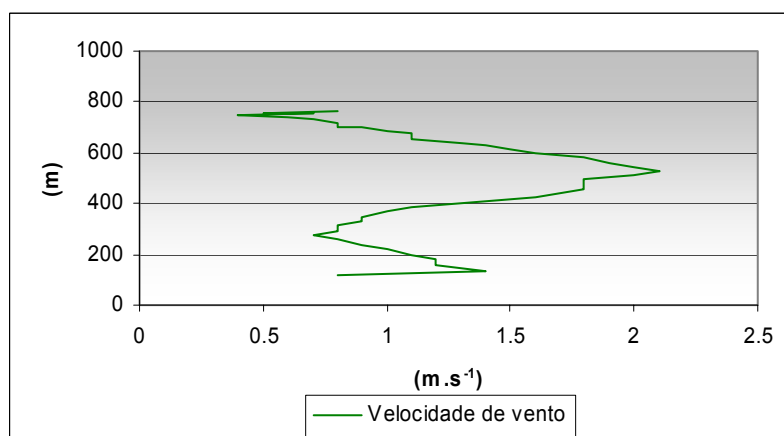


Figura 70. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:37.

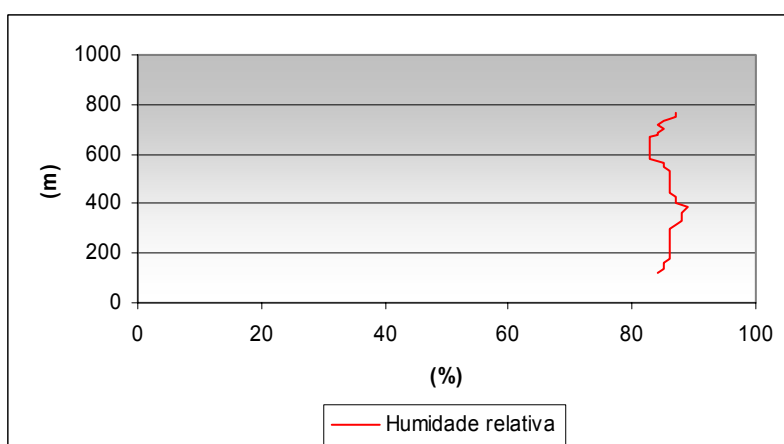


Figura 71. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:37.

Radiossondagem 7

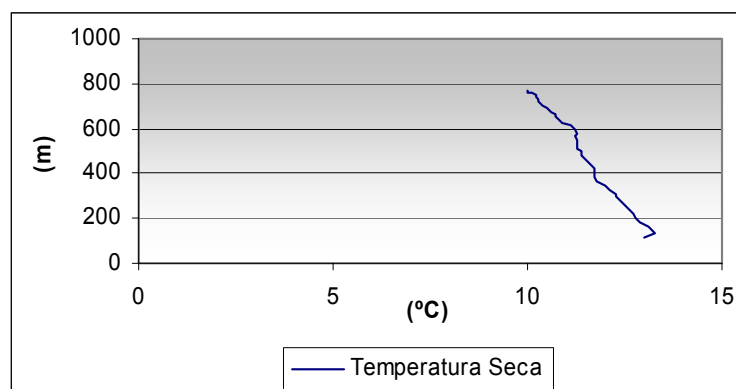


Figura 72. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:48.

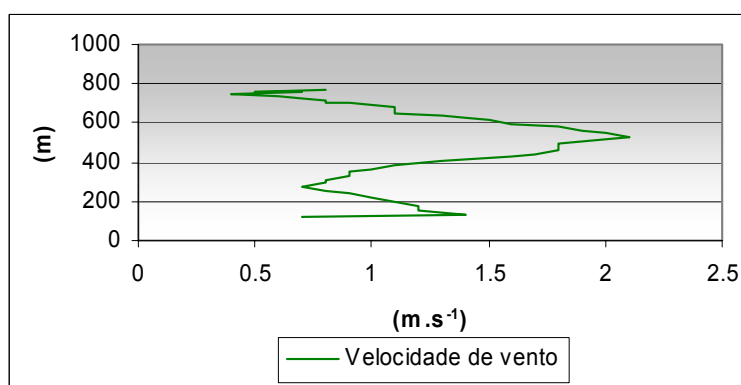


Figura 73. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:48.

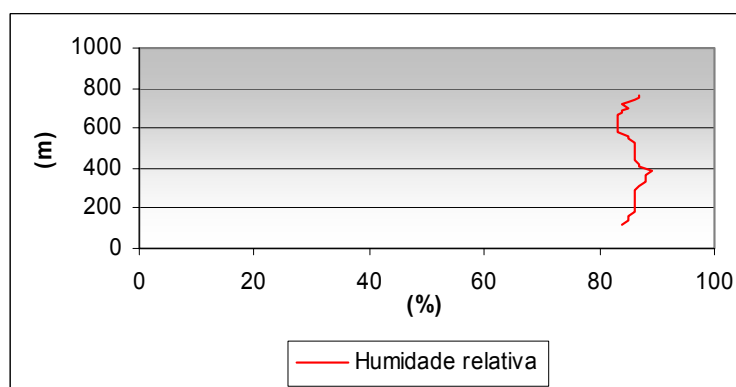


Figura 74. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:48.

Radiossondagem 8

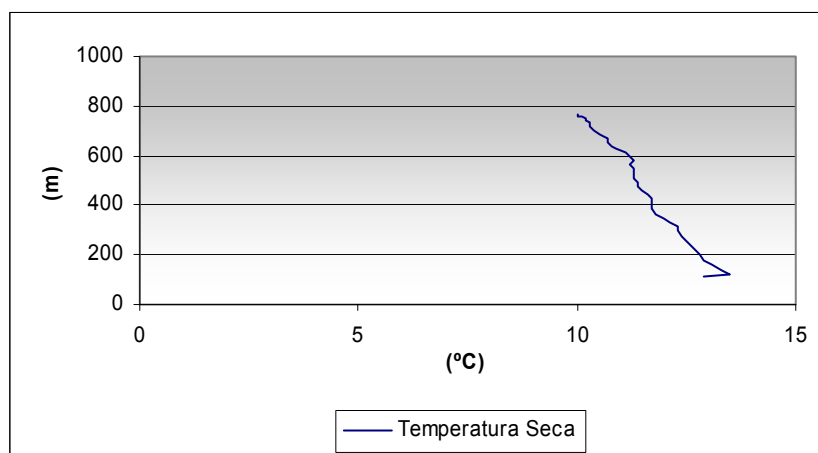


Figura 75. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:50.

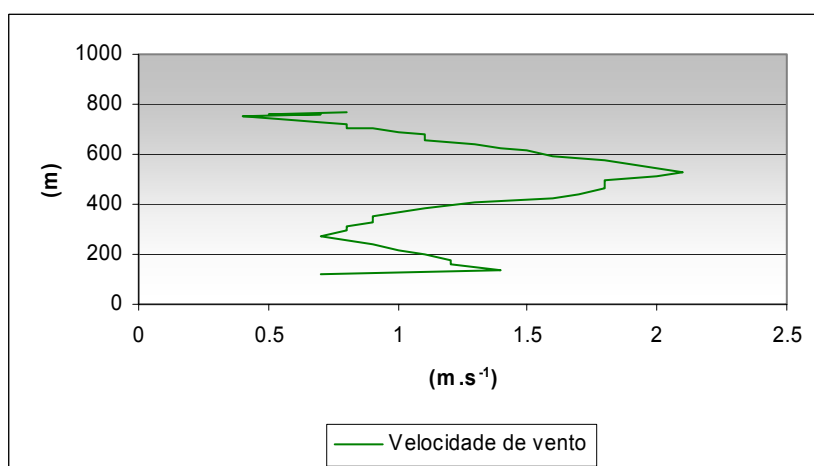


Figura 76. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:50.

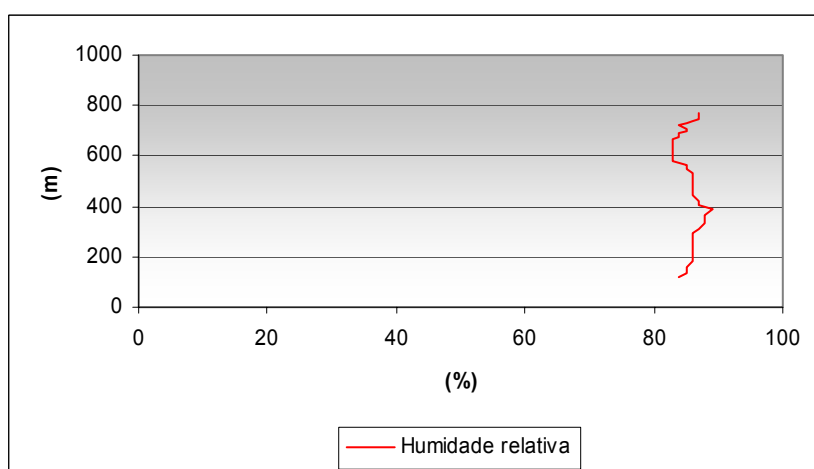


Figura 77. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:50.

Radiossondagem 9

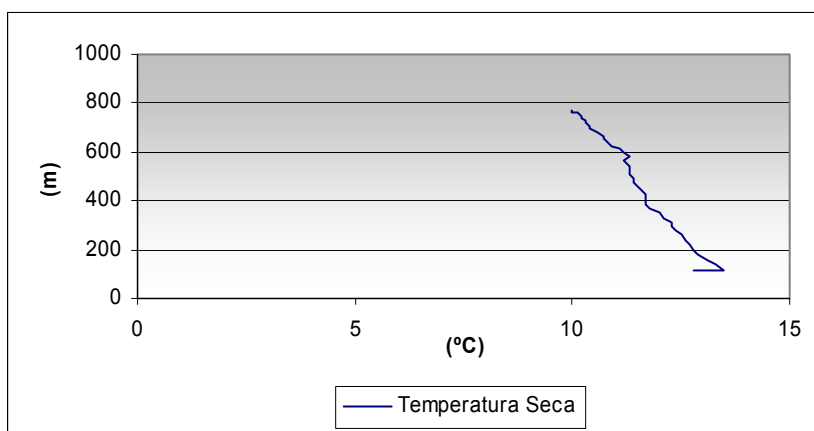


Figura 78. Perfil vertical de temperatura medido em 17/11/1987 17:58.

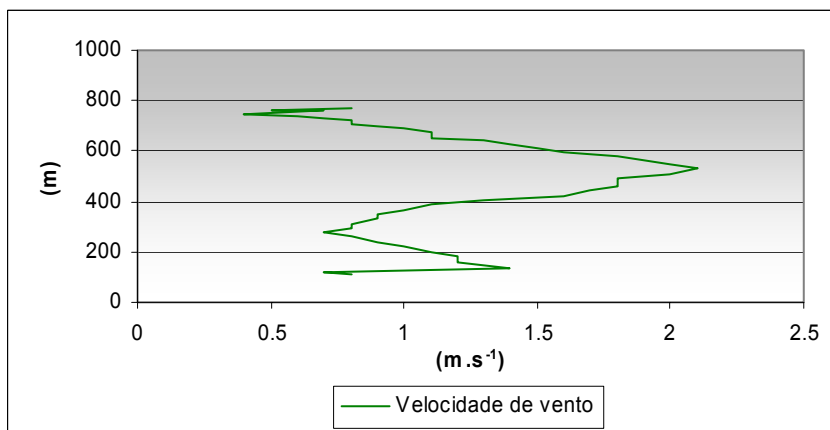


Figura 79. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 17/11/1987 17:58.

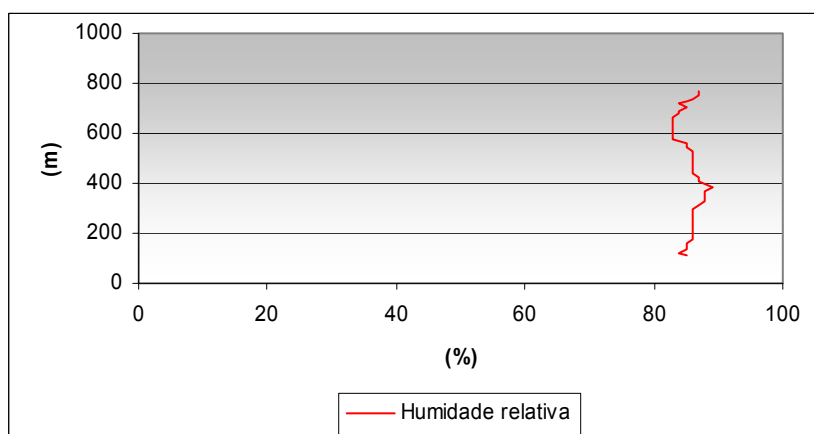


Figura 80. Perfil vertical de humidade relativa medido em 17/11/1987 17:58.

Radiossondagem 10

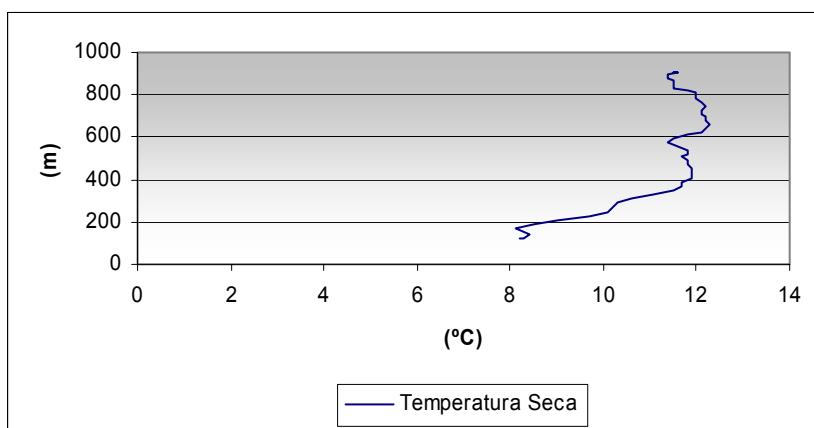


Figura 81. Perfil vertical de temperatura medido em 19/11/1987 16:07.

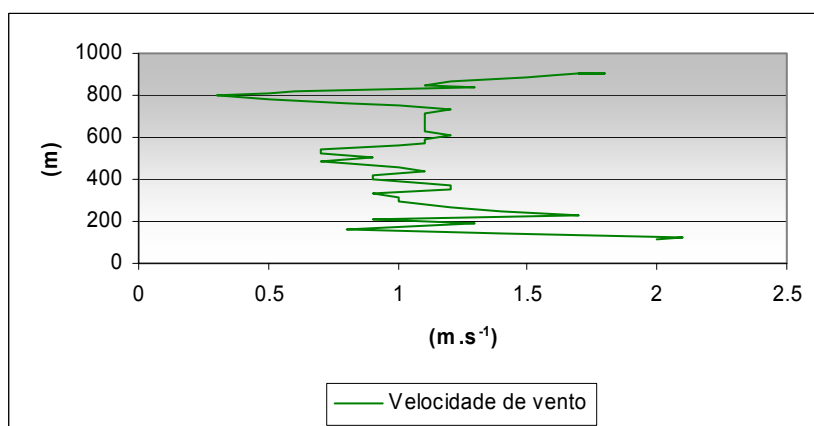


Figura 82. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 19/11/1987 16:07.

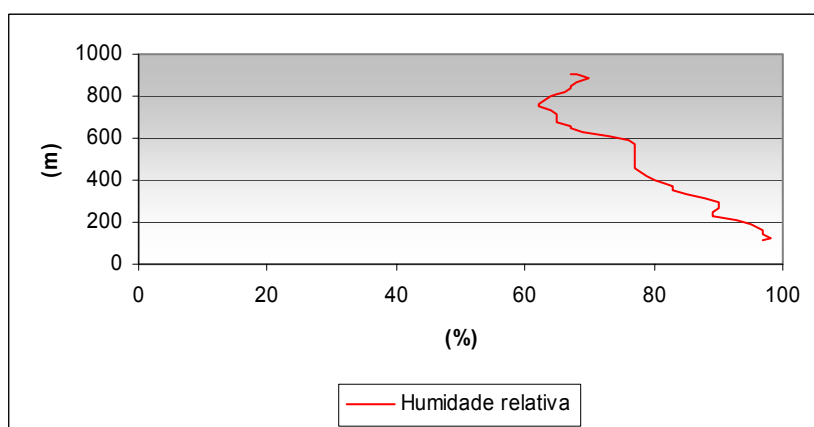


Figura 83. Perfil vertical de humidade relativa medido em 19/11/1987 16:07.

Radiossondagem 11

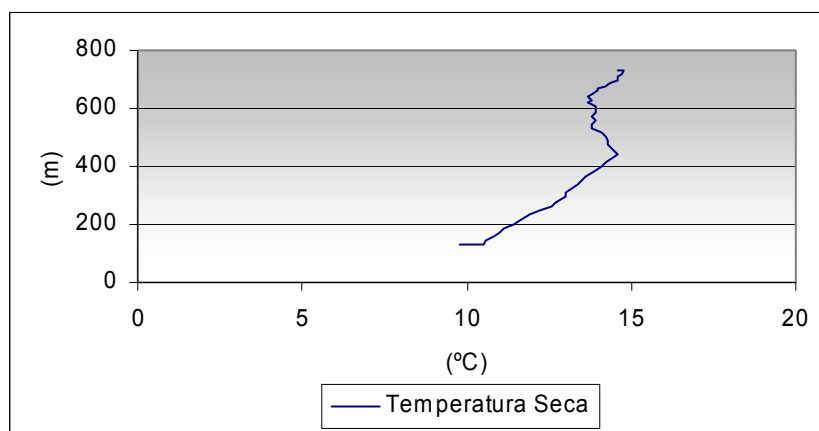


Figura 84. Perfil vertical de temperatura medido em 19/11/1987 16:20.

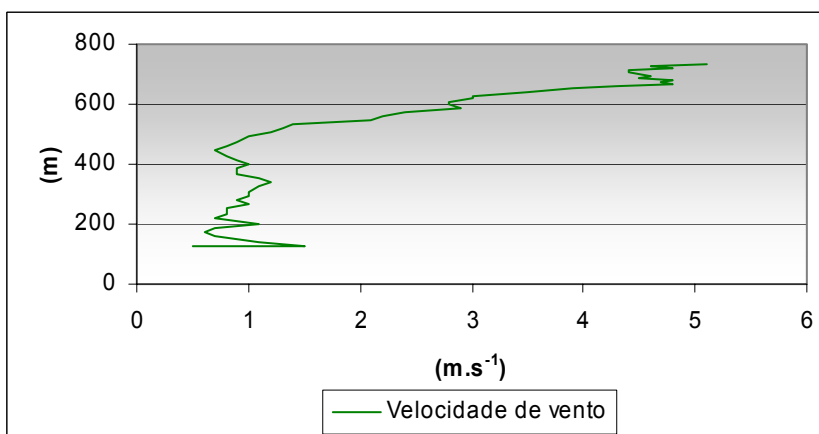


Figura 85. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 19/11/1987 16:20.

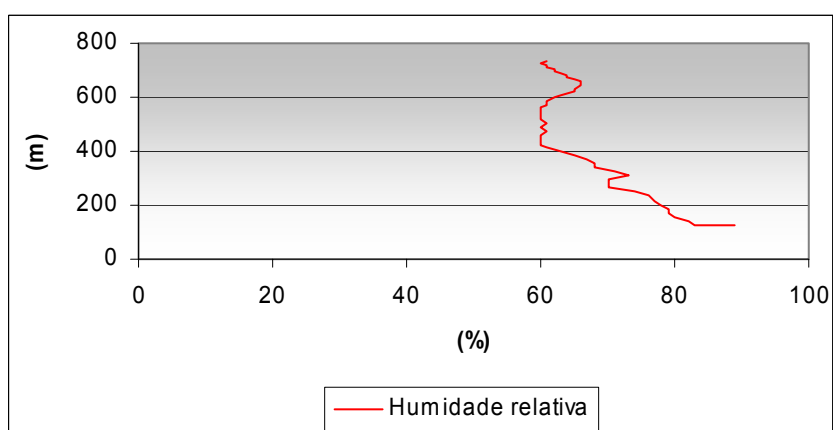


Figura 86. Perfil vertical de humidade relativa medido em 19/11/1987 16:20.

Radiossondagem 12

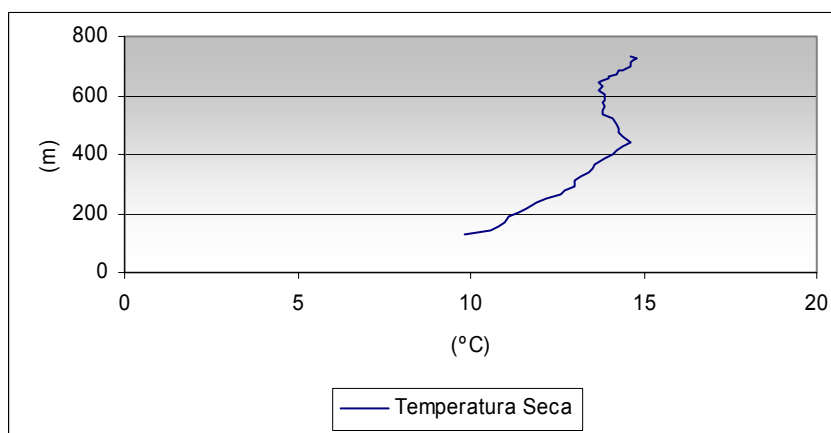


Figura 87. Perfil vertical de temperatura medido em 19/11/1987 16:27.

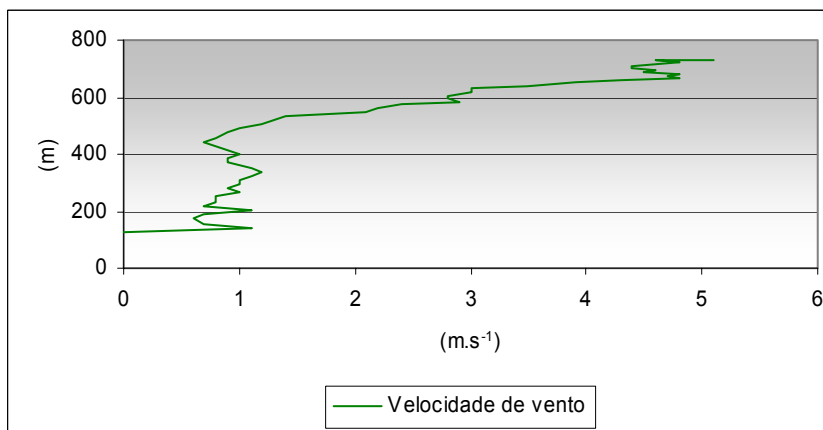


Figura 88. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 19/11/1987 16:27.

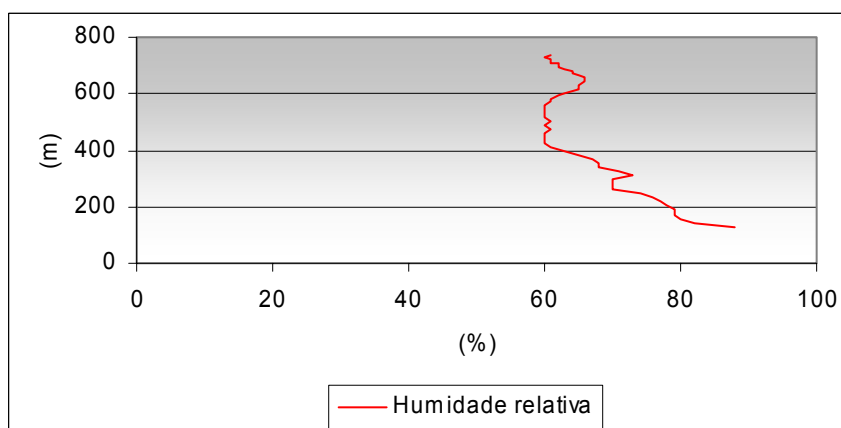


Figura 89. Perfil vertical de humidade relativa medido em 19/11/1987 16:27.

Radiossondagem 13

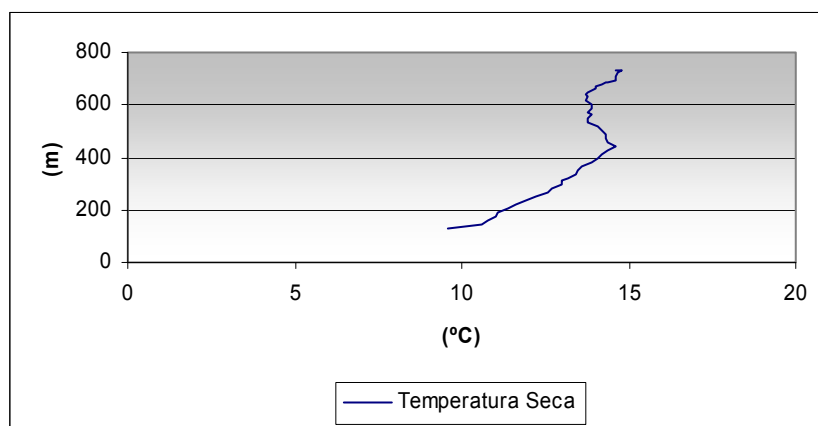


Figura 90. Perfil vertical de temperatura medido em 19/11/1987 16:33.

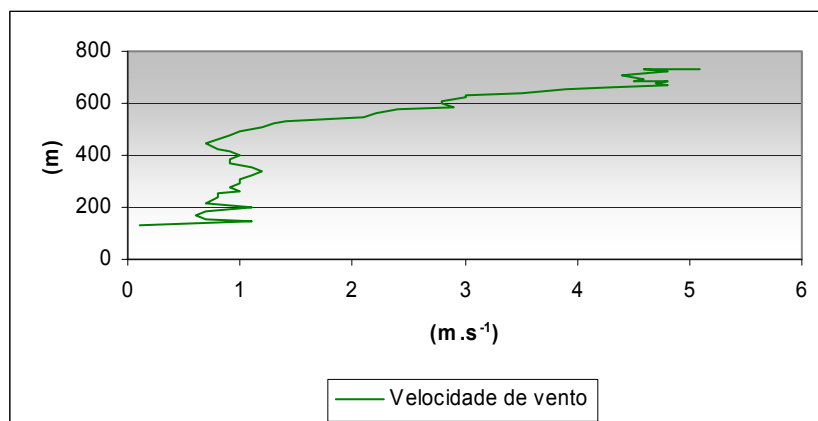


Figura 91. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 19/11/1987 16:33.

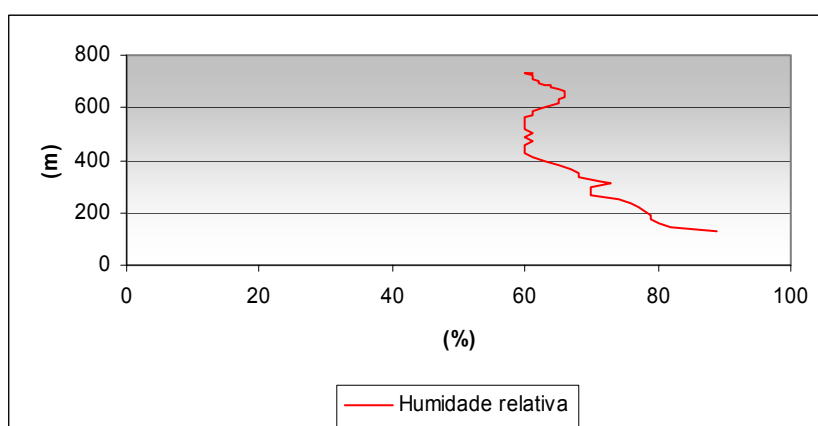


Figura 92. Perfil vertical de humidade relativa medido em 19/11/1987 16:33.

Radiossondagem 14

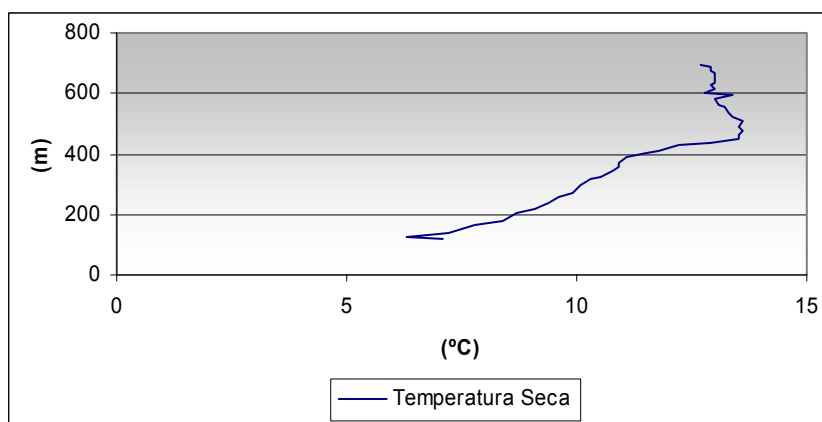


Figura 93. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 12:51.

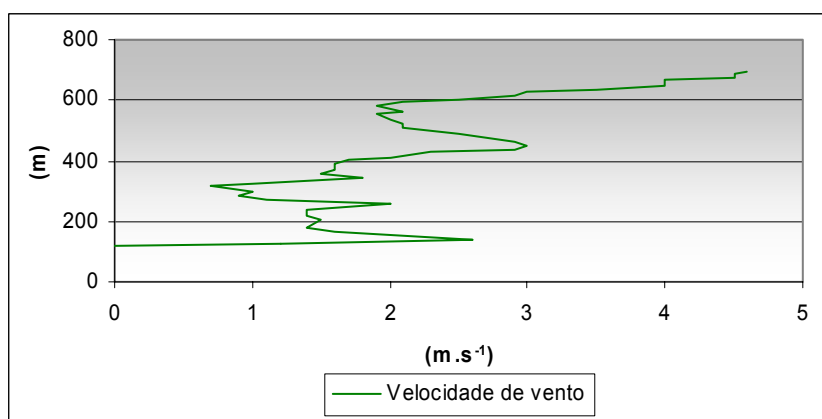


Figura 94. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 12:51.

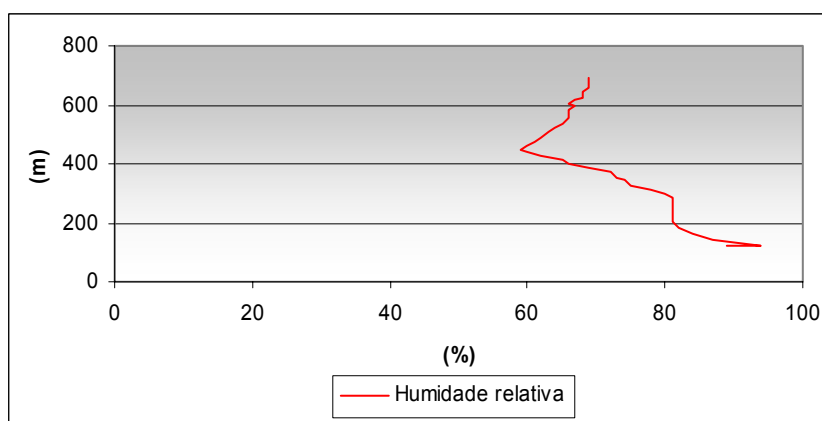


Figura 95. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 12:51.

Radiossondagem 15

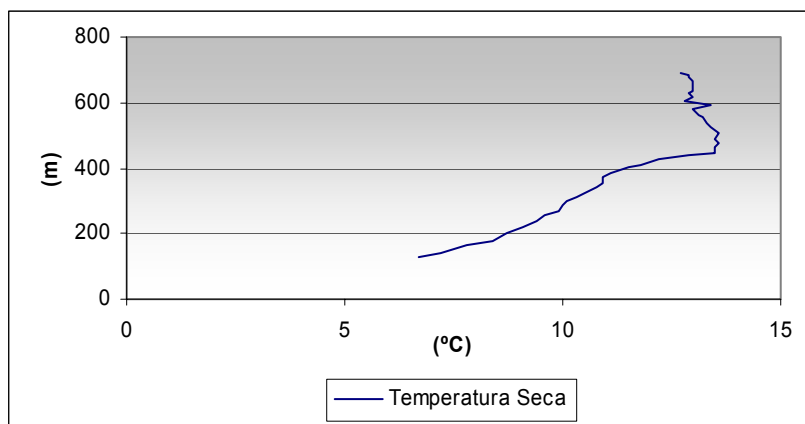


Figura 96. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 12:58.

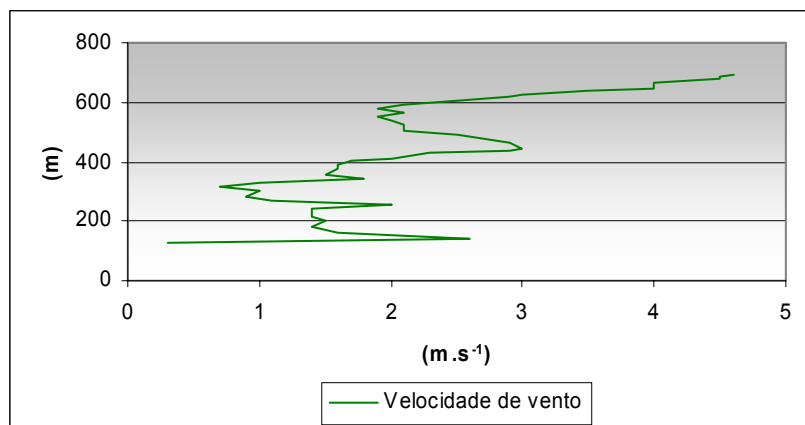


Figura 97. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 12:58.

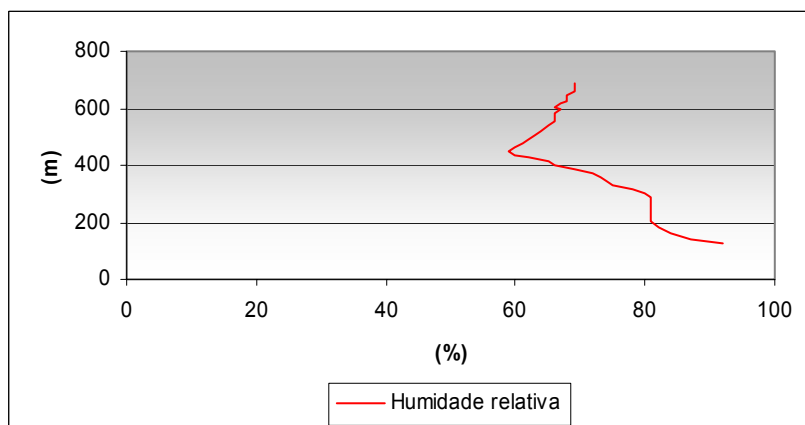


Figura 98. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 12:58.

Radiossondagem 16

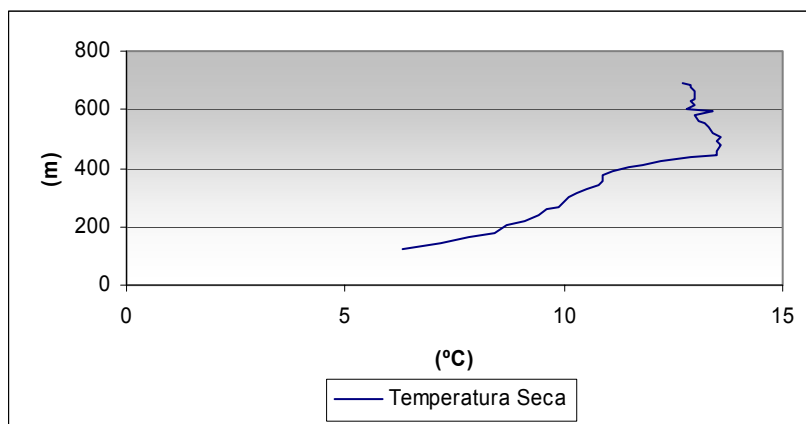


Figura 99. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 13:05.

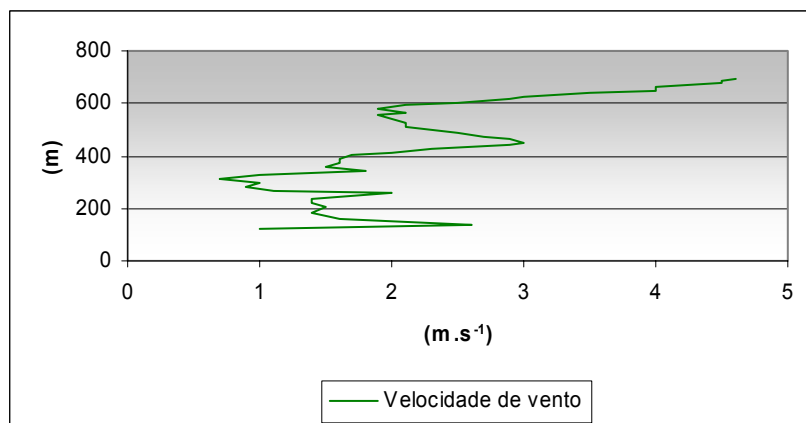


Figura 100. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 13:05.

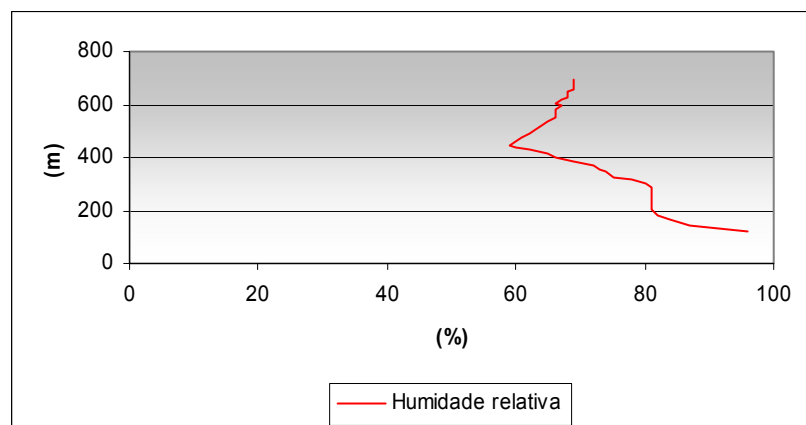


Figura 101. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 13:05.

Radiossondagem 17

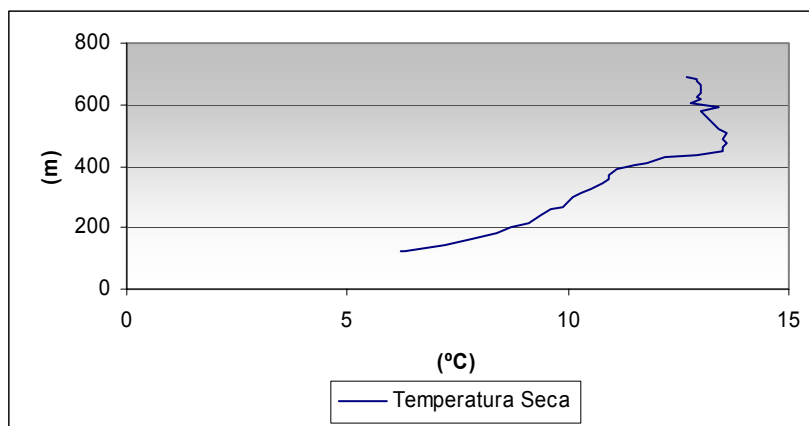


Figura 102. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 13:12.

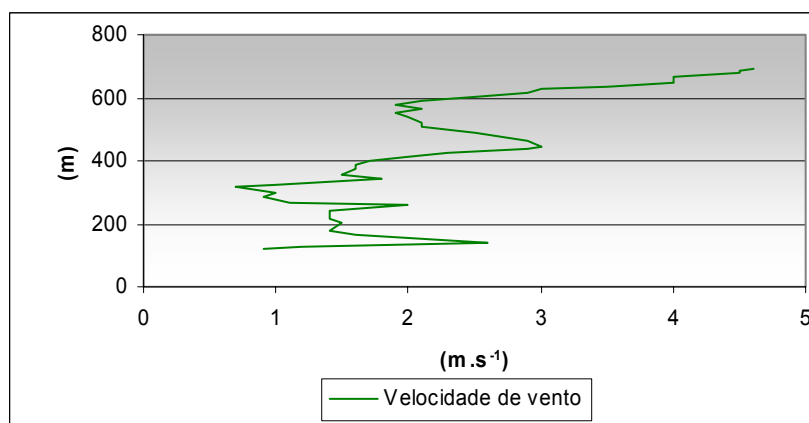


Figura 103. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 13:12.

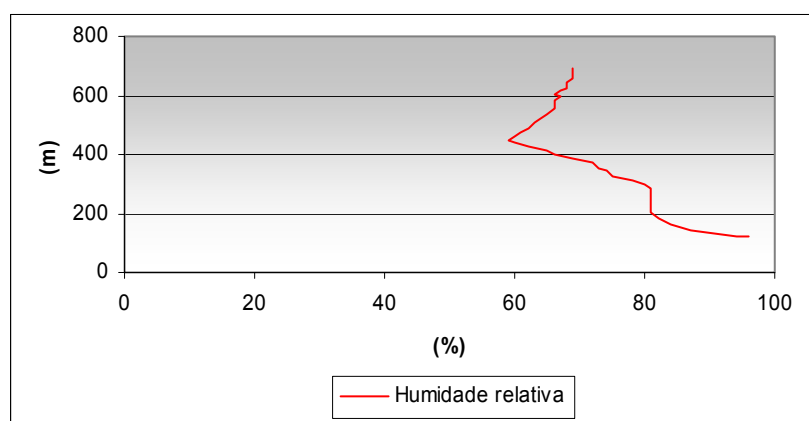


Figura 104. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 13:12.

Radiossondagem 18

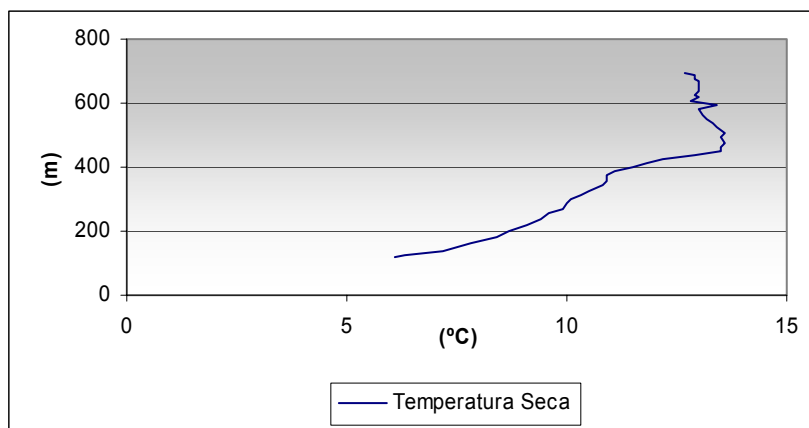


Figura 105. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 13:23.

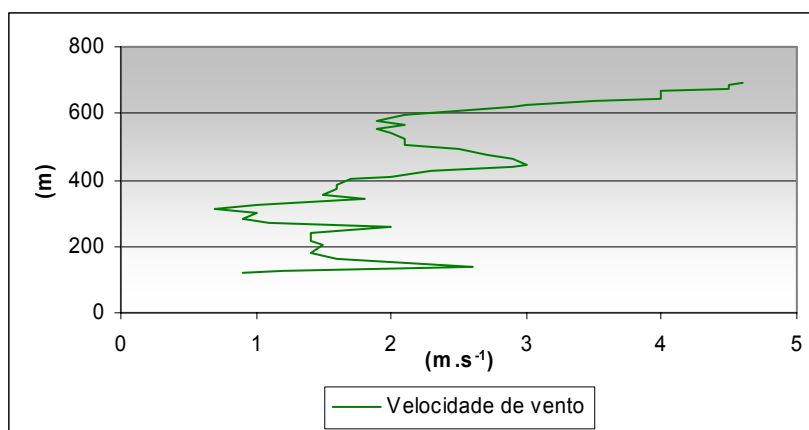


Figura 106. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 13:23.

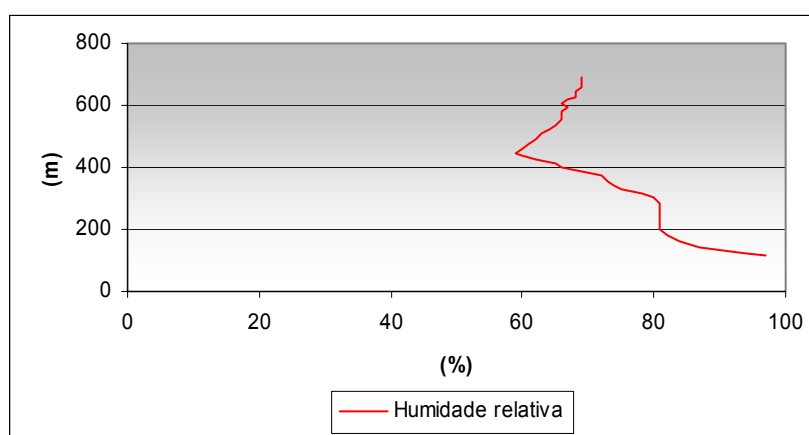


Figura 107. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 13:23.

Radiossondagem 19

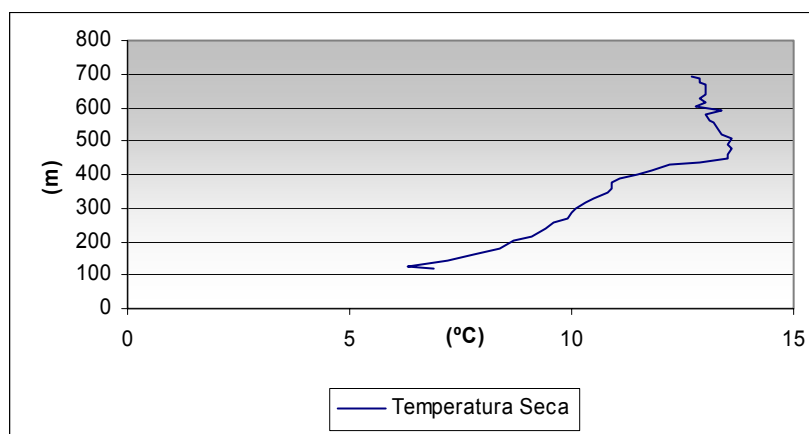


Figura 108. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 17:31.

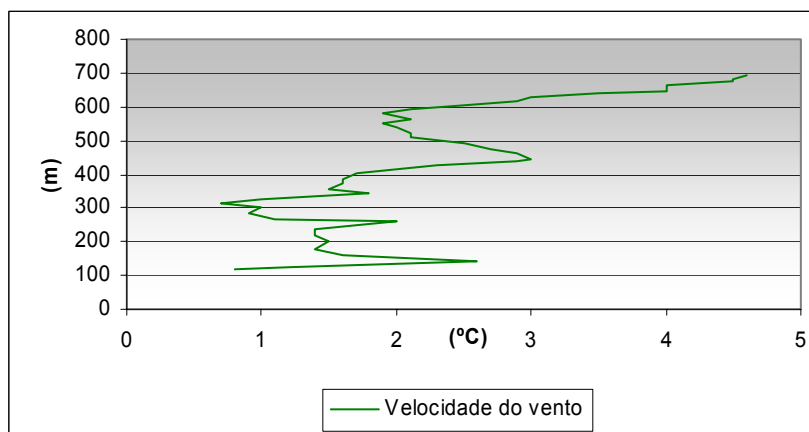


Figura 109. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 17:31.

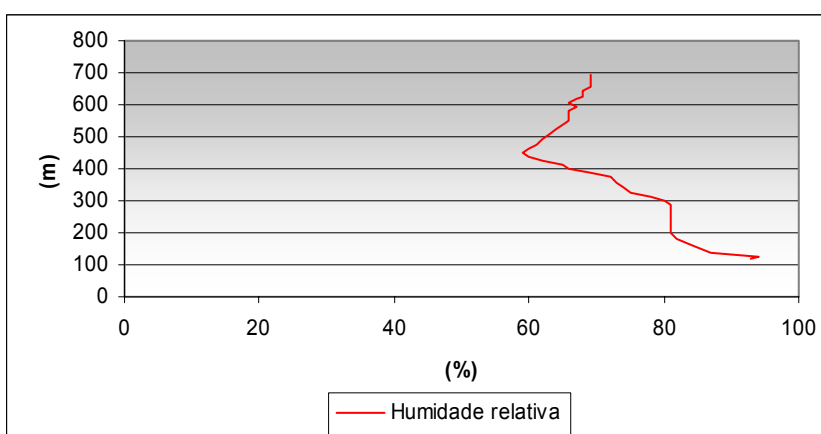


Figura 110. Perfil vertical de umidade relativa medido em 20/11/1987 17:31.

Radiossondagem 20

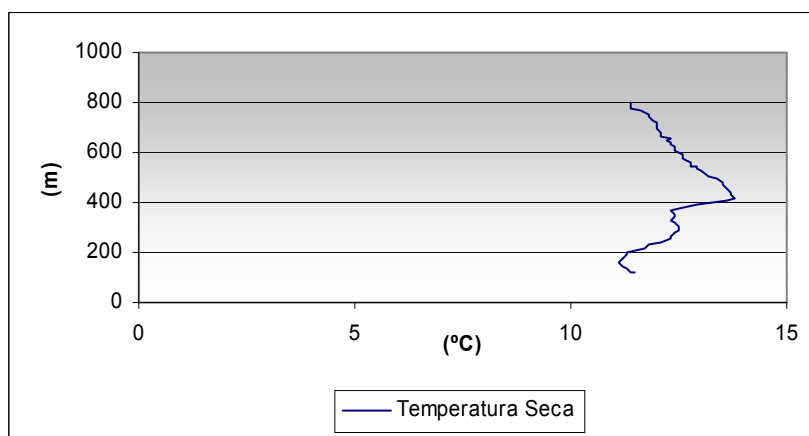


Figura 111. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 17:31.

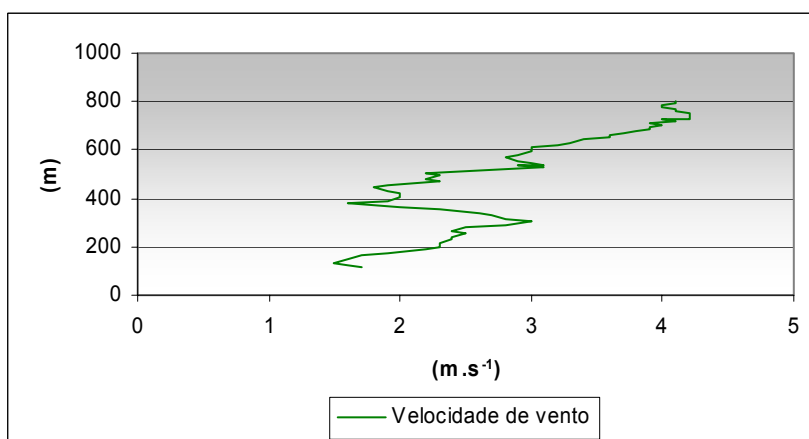


Figura 112. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 17:31.

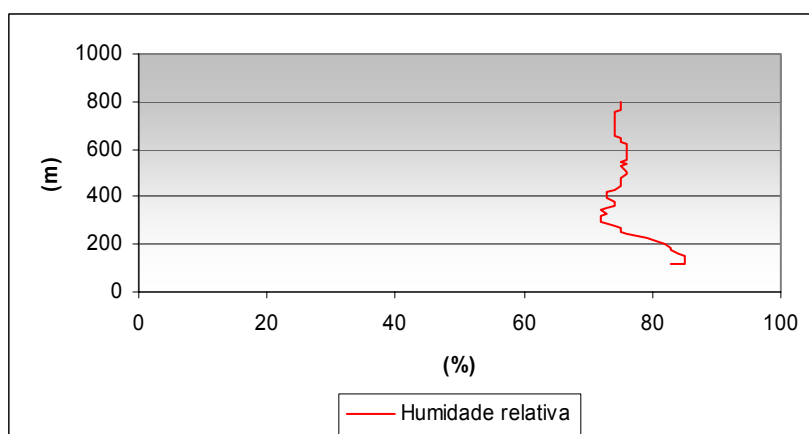


Figura 113. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 17:31.

Radiossondagem 21

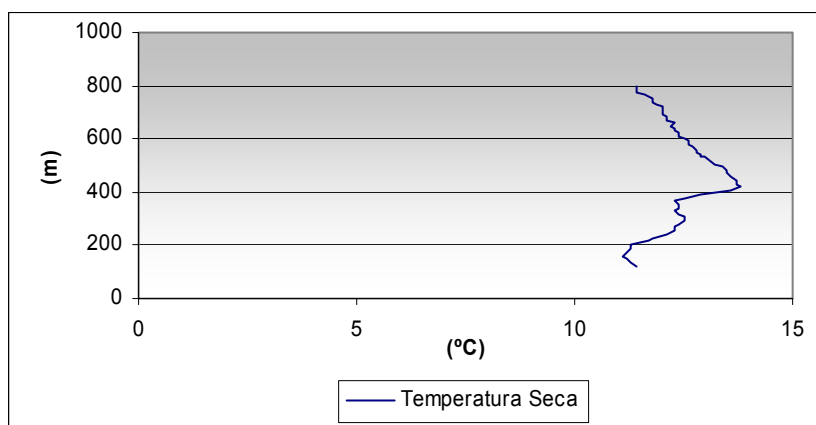


Figura 114. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 17:39.

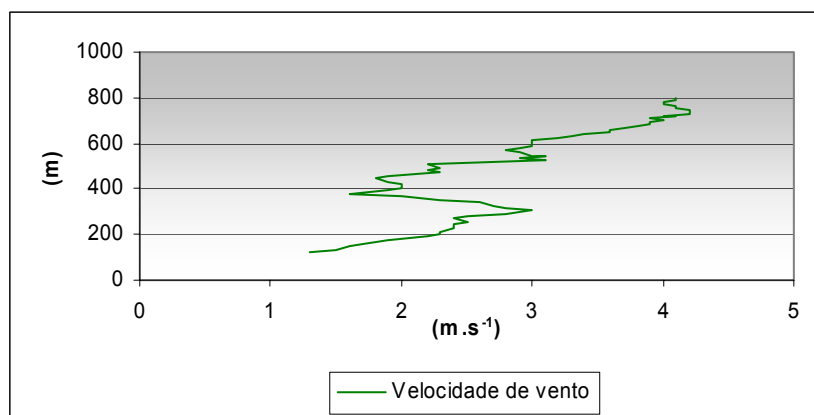


Figura 115. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 17:39.

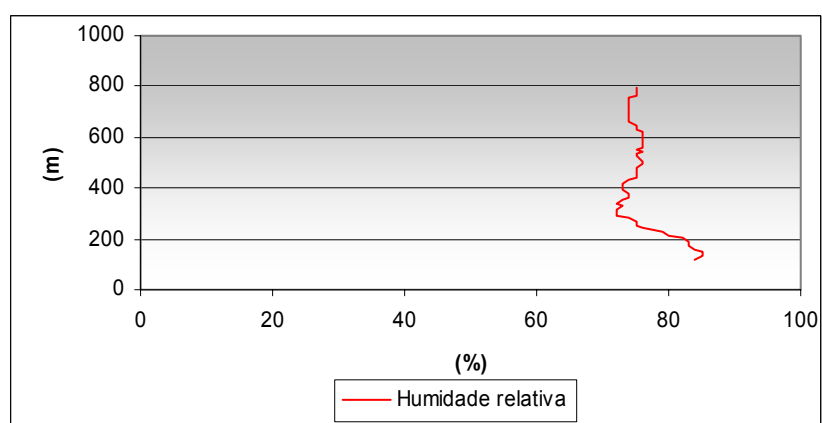


Figura 116. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 17:39.

Radiosondagen 22

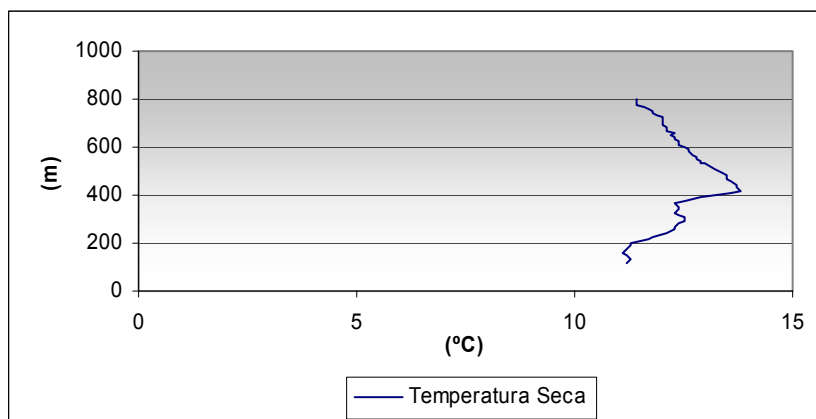


Figura 117. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 17:49.

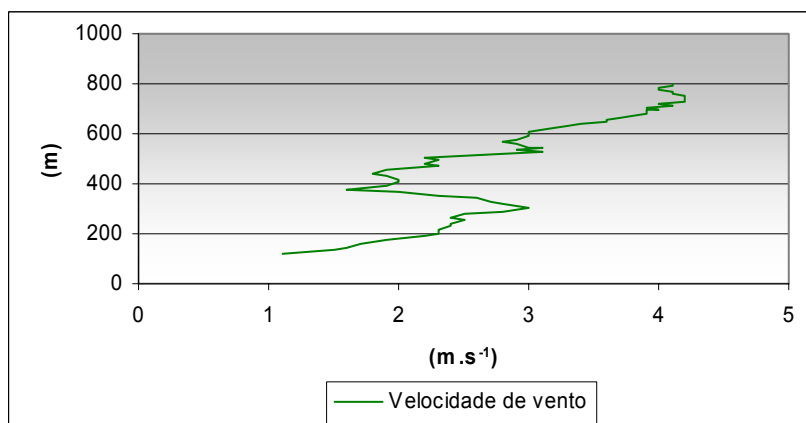


Figura 118. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 17:49.

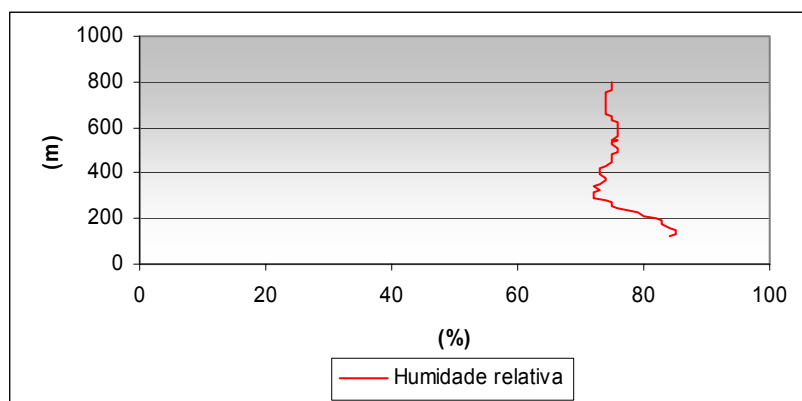


Figura 119. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 17:49.

Radiossondagem 23

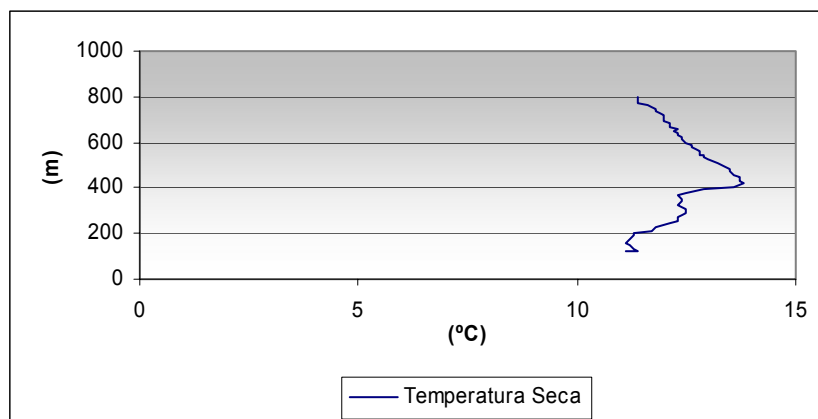


Figura 120. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 17:59.

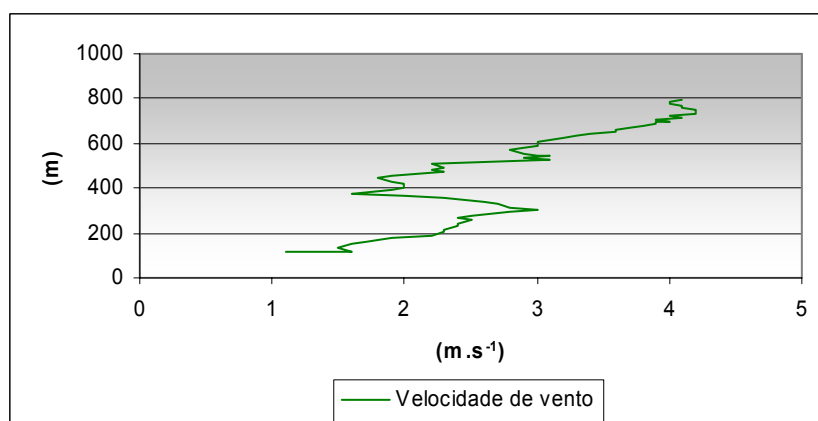


Figura 121. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 17:59.

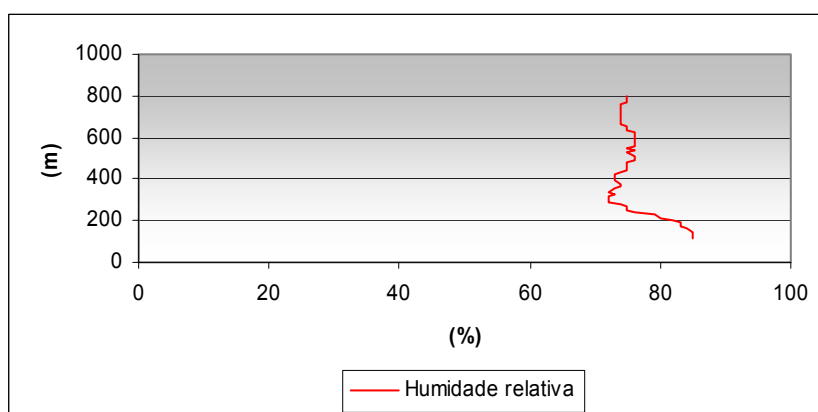


Figura 122. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 17:59.

Radiossondagem 24

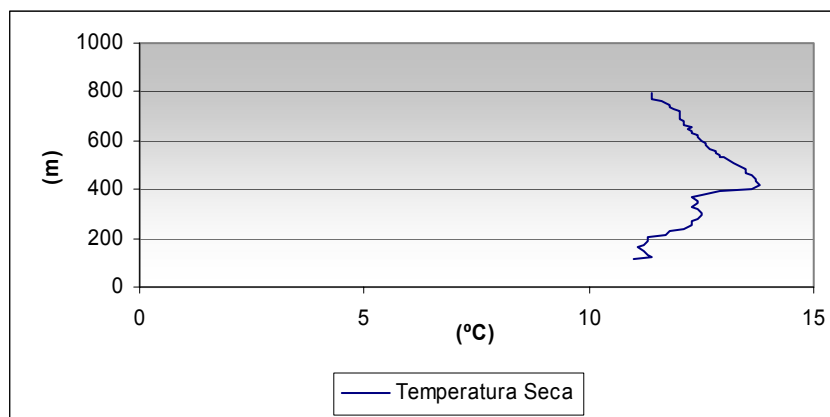


Figura 123. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 18:09.

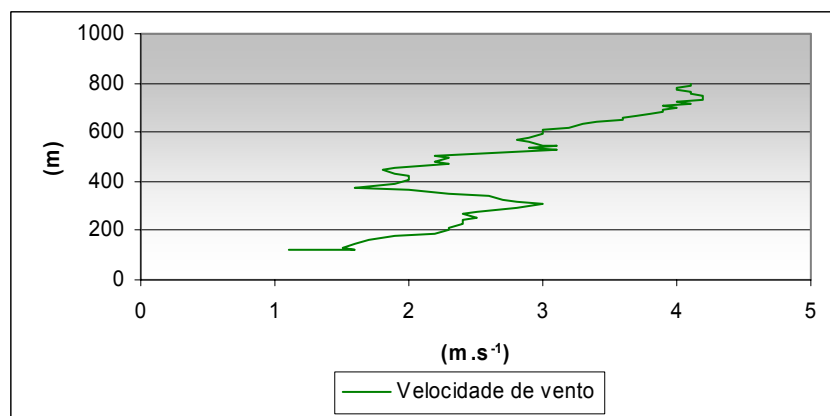


Figura 124. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 18:09.

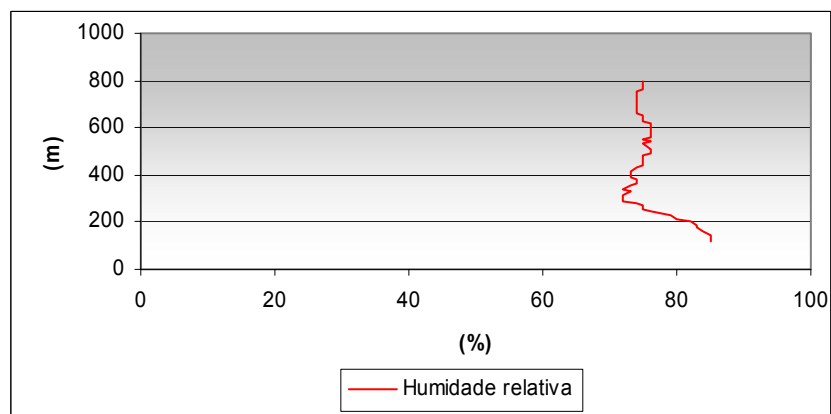


Figura 125. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 18:09.

Radiossondagem 25

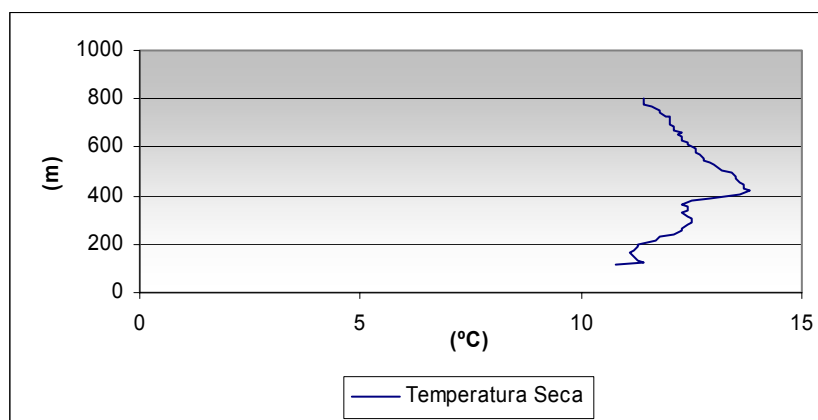


Figura 126. Perfil vertical de temperatura medido em 20/11/1987 18:19.

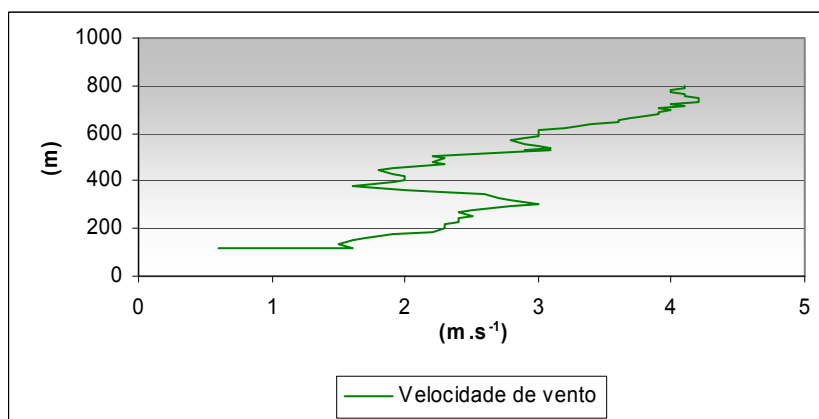


Figura 127. Perfil vertical de velocidade de vento medido em 20/11/1987 18:19.

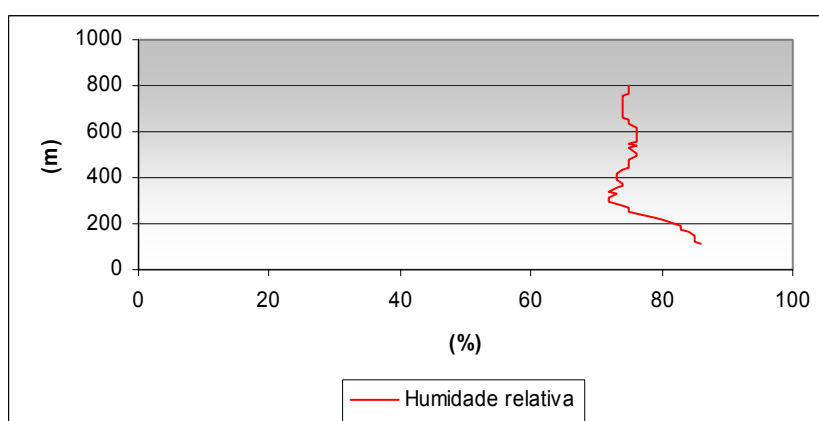


Figura 128. Perfil vertical de humidade relativa medido em 20/11/1987 18:19.